解 説

HRP遠隔操作プラットフォーム

Telexistence Control Cockpit System for HRP

舘 暲[*1] 小森谷 清[*2] 澤田一哉[*3] 井床利之[*4]
井上幸三[*5]

[*1]東京大学大学院工学系研究科 [*2]機械技術研究所ロボット工学部 [*3]松下電工株式会社 [*4]川崎重工業株式会社 [*5]ファナック株式会社

Susumu Tachi[*1], Kiyoshi Komoriya[*2], Kazuya Sawada[*3], Toshiyuki Itoko[*4] *and* Kozo Inoue[*5]

[*1]The University of Tokyo [*2]Mechanical Engineering Laboratory, MITI [*3]Matsushita Electric Works, Ltd. [*4]Kawasaki Heavy Industries, Ltd. [*5]Fanuc Ltd.

1. はじめに

プラント・発電所などの保守や建設作業，災害時の調査や救援・救助活動，あるいは高齢者や病人の介護介助などといった人間協調共存環境において，人間の活動や行動を支援してくれる人間型ロボットシステムの実現が強く望まれている．

人間型ロボットの人間協調共存環境における適用を考えるとき，人間をすべて置き換え代行するという全自律型ロボットは，知能の面からも安全や責任の面からも，自ら限界があるため特に高度な判断は人間にゆだねざるを得ず，人間がロボットを遠隔から支援し操作することが必要不可欠である．このとき，操作者の視聴覚や力覚機能を拡張して高臨場感操作を実現するテレイグジスタンス技術 [1] がキーテクノロジーとなる．

テレイグジスタンス技術の導入により，操作者はあたかもロボットの働く場に自分が存在するかのような感覚をもってロボットを操作し，ロボットの活動を支援できるだけではなく，人間がロボットを利用し活用することで，人間が本来有していた時間的・空間的制約をなくして，人間の行動，活動を拡充できるといったまったく新しい効果も期待されており，それはアールキューブ構想として知られている [2][3]．つまり理想的には，テレイグジスタンスによって人間が時間と空間の制約から解放され，自在にロボットのいる場所にテレイグジスタンスすることで，自由な時間に通常行けない場所での活動も行えるようになり，医療福祉，コミュニケーション，レジャー，アミューズメント，エンターテインメントなど多岐にわたる分野で人間能力を拡張する様々な応用が可能となるのである．

本総説論文では，通産省応用産技プロジェクト「人間協調・共存型ロボットシステムの開発」（略称 HRP，平成 10〜14 年度）において，人間型 2 足歩行ロボットをテレイグジスタンスを用いて遠隔操作することを目的として開発した遠隔操作プラットフォーム [4] について概説する．さらに，遠隔操作プラットフォームと人間型 2 足歩行ロボットとを結合し，ロボット操作の統合試験として実施した遠隔ショッピングデモンストレーション実験の概要についても述べる．

2. スーパーコックピット

2.1 システム全体構成

スーパーコックピットは，操作者の視聴覚や力覚機能を拡充し，あたかもロボットの場にいるかのような高臨場感操作を実現することをねらいとして開発した遠隔操作プラットフォームである．また本コックピットは，インターネットなどの情報ネットワークを通じて，より遠隔地からでもロボットを簡易に操作するための遠隔ネットワーククライアント用のサーバーとしての機能も有している．

スーパーコックピット全体の概要を**図 1** に，システム構成を**図 2** に示す．本システムは，大別して視聴覚情報提示・通信システムと運動操作感覚提示システムとから構成されている．

2.2 視聴覚情報提示・通信システム [5]

視聴覚情報提示・通信システムは，操作者がコックピットにいながらにして，ロボットの存在する場所にいるかのように感じるための高度な臨場感を実現するための視聴覚提示機能，およびロボットとの間の物理的距離を感じさせない通信コミュニケーション機能を提供するシステムである．本システムは，包囲型ディスプレイ，ヘッドトラッキング付 HMD（Head Mounted Display），操作支援用視覚情報提示システム，立体音響提示システム，および通信システムから構成されている．

原稿受付 2000 年 10 月 30 日
キーワード：Telexistence (Tele–existence), Immersive Projection Technology (IPT), Humanoid Robot Control, Master–slave System, Sensation of Presence, Kinesthetic sensation, Force Control, Haptic Interface

[*1]〒 113–8656 文京区本郷 7–3–1
[*2]〒 305–8564 つくば市並木 1–2
[*3]〒 571–8686 門真市大字門真 1048
[*4]〒 278–8585 野田市二ツ塚 118
[*5]〒 401–0597 山梨県忍野村
[*1]Bunkyo–ku, Tokyo
[*2]Tsukuba–shi, Ibaraki
[*3]Kadoma–shi, Osaka
[*4]Noda–shi, Chiba
[*5]Oshino–mura, Yamanashi

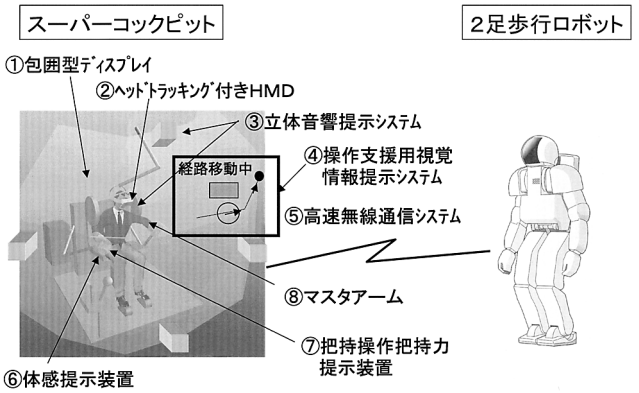


図 1　スーパーコックピットの概要

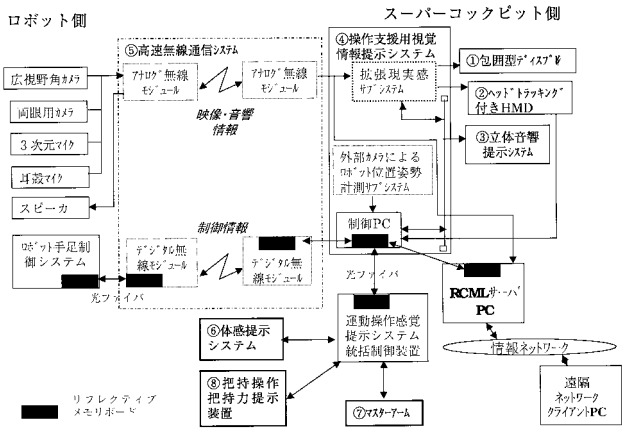


図 2　スーパーコックピット構成図

1）包囲型ディスプレイ [6]〜[8]

包囲型ディスプレイは，図 1 右のロボットに搭載された広視野角カメラシステムで撮影した立体映像を，スーパーコックピット内の操作者に提示するシステムである．人間型ロボットが移動する際の周囲環境の映像を，高度な臨場感を持って提示することを目的としている．

本システムの外観を**図 3** に示す．スクリーン面は 9 面の多面体形状をしており，これらは球面の接平面近似となっている．各面の中心を通る法線は一点で交わる構成になっており，操作者はこの交叉点から映像を観察する．各スクリーン面を見込む角度と，後述の広視野角カメラシステムに用いるカメラの視野角を合わせることで，撮影した映像は実時間で提示可能となっている．

映像提示には合計 18 台の液晶プロジェクタを用いている．すなわち，各スクリーン面の背面に 2 台ずつの液晶プロジェクタを右眼映像提示用と左眼映像提示用として配し，映像はそれぞれの投影光に円偏光フィルタを介してスクリーン面に投影される．操作者は偏光眼鏡をかけて映像を見ることで立体視が実現される．包囲型ディスプレイの主な仕様を**表 1** に示す．

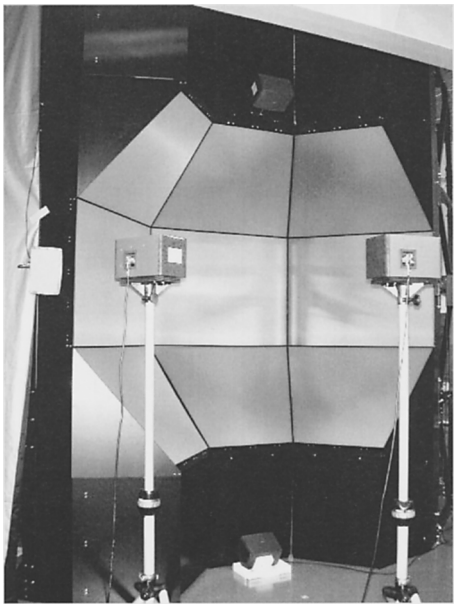


図 3　包囲型ディスプレイ

表 1　包囲型ディスプレイ仕様

ディスプレイ形状	・9 面多面体形状（球面の接平面近似） ・中心法線が一点で交叉
視野角	150°（H)×117°（V)
解像度（角度分解能）	2′ 56″（視力 0.34 相当）
提示面までの距離	約 1.3m（推奨観察位置より）
立体視方式	偏光方式（円偏光）

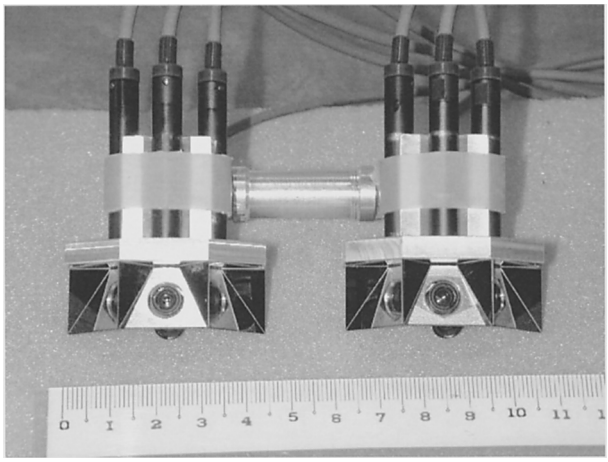


図 4　広視野角カメラシステム

次に，包囲型ディスプレイに提示する映像を撮影するために人間型ロボットに搭載する広視野角カメラシステムについて述べる．本システムは，4 台の小型 CCD カメラから成るカメラ群を 2 基，人間の平均的な眼間距離である 65 [mm] 離して左眼用と右眼用に配して構成されている．外観を**図 4** に，ロボットへの搭載状況を**図 5** に示す．

理想的には提示面にあわせた 18 台が望ましいが，ロボッ

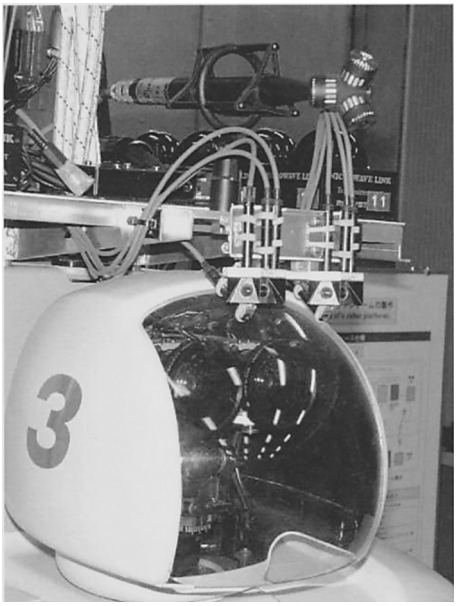


図 5　広視野角カメラシステムのロボットへの搭載状況

表 2　広視野角カメラシステム仕様

視野角	150°(H)×78°(V)(上方 19°、下方 59°)
角度分解能	6′23″(視力 0.16 相当)
カメラ台数	8 台(各カメラ群を 4 台で構成)
眼間距離	65mm
その他	カメラ群を構成するカメラどうしの主点は一致

トへの搭載重量の制約，およびロボットとスーパーコックピット間での伝送可能な映像信号のチャネル数の制約により，小型 CCD カメラは計 8 台という台数にしてある．この片眼 4 台（合計 8 台）というカメラ台数の制約の下での適正カメラ配置については，ロボット歩行時の移動感覚を高臨場感で提示するには水平方向の広視野映像と下方視野が特に重要であるという知見から，包囲型ディスプレイの正面，左右側面ならびに下方面の計 4 面のスクリーン面への映像提示に対応した撮像が行える配置とした．広視野角カメラシステムの主な仕様を**表 2** に示す．

2）ヘッドトラッキング付 HMD

操作者が人間型ロボットの手腕を用いて作業を行う際には，視野角は多少狭くとも，操作者が注目する方向の三次元映像と人間の腕の位置を視覚情報によらず感じ取っている固有受容情報との正確な一致が重要であり [9]，頭部搭載型ディスプレイ（HMD）による実現が現状の技術では最適である．そこで，**図 6** に示すカウンタバランス機構を有するヘッドトラッキング付 HMD システムを開発した．本システムを構成する HMD とヘッドトラッカーの仕様を**表 3** と**表 4** に示す．

本システムでは，人間型ロボットに元々搭載されている両眼カメラが捉える映像が HMD に提示される．操作者が

図 6　ヘッドトラッキング付 HMD

表 3　HMD 仕様

提示方式	液晶（ｱｸﾃｨﾌﾞﾏﾄﾘｸｽ TFT）
画素数	921,600
画像入力	VGA
視野角	水平４８度、垂直３６度
重量	約９００ｇ
その他	はねあげ機構、眼間調整機能あり

表 4　ヘッドトラッカー仕様

測定周波数	最大 300Hz
時間遅れ	平均 2msec 以下
空間分解能	約 0.63mm（ただし計測範囲位置に依存する）
測定精度	0.5cm
計測範囲	約 91cm(直径)×45cm(高さ)の半円筒形
信号出力	RS-232C

頭を動かせば，ロボット側の両眼カメラもそれに追従して動き，その結果，操作者は自分の向いた方向の映像を見ることができるとともに，自分の腕があると固有受容感覚で感じる場所にロボットの腕を見るため自分がロボットのなかに入り込んだ，あるいは自分がロボットの鎧を着て直接作業しているような感覚が生じる．なお，操作者が HMD を利用しての作業の局面から包囲型ディスプレイを利用しての移動の局面に容易に移れるように，HMD には跳ね上げ機構を付加している．

3）操作支援用視覚情報提示システム [10][11]

操作支援用視覚情報提示システムは，スーパーコックピット内の操作者の移動操作および作業操作を支援するための操作インタフェースである．この操作インタフェースを実現する制御ソフトウェアの状態遷移図を**図 7** に示す．移動制御と作業制御の両モードがあり，各モード内には，状況を把握して計画を立てるためのシミュレーション機能と，実際に行動を実行する制御機能とが含まれている．

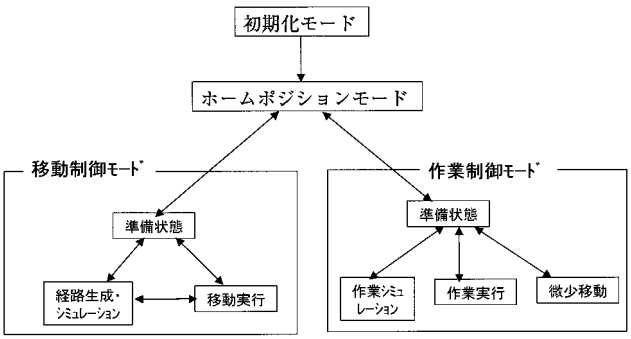


図 7 操作インタフェース状態遷移図

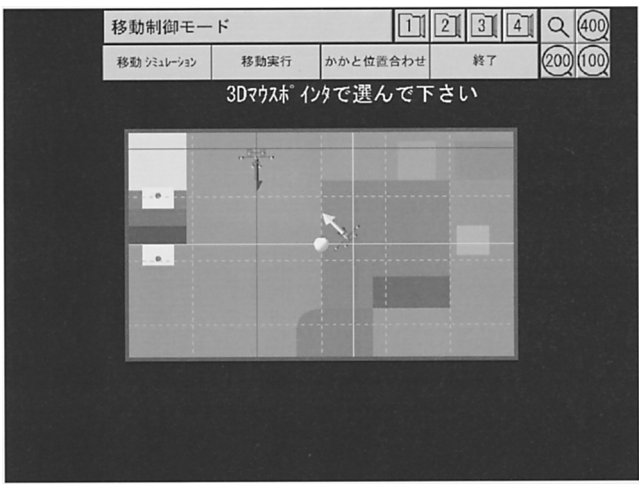


図 8 操作メニュー例

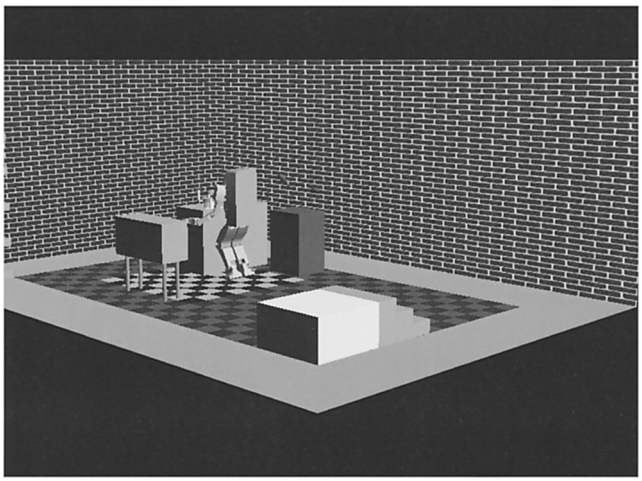


図 9 ロボット稼動環境の VR 表示例

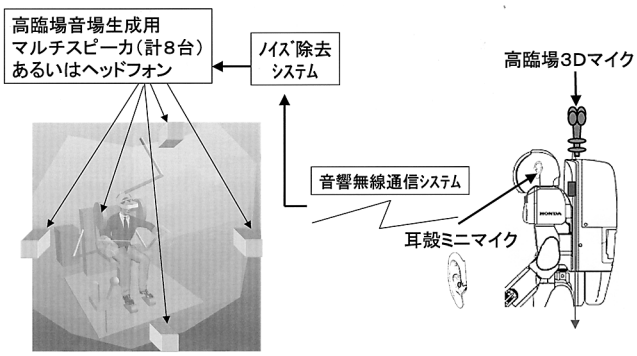


図 10 立体音響提示システム構成図

移動制御の際には，操作者は包囲型ディスプレイを見て操作を行っている．このとき，包囲型ディスプレイの左下面には操作メニューおよび移動環境の二次元地図（**図 8** 参照）が，右下面には大局情報として第 3 者の視点からのロボットの位置・姿勢や周囲環境が VR（人工現実感）空間として表示される（**図 9** 参照）．操作者は，マウス操作により，左下面の操作メニュー中の各種コマンドやロボット移動の目標位置などを選択し，移動操作を行う．

移動制御から作業制御へのモード変更は，包囲型ディスプレイの左下面の操作メニュー画面で行う．作業制御の際には，操作者は，後述のマスタアームならびに把持操作把持力提示装置を両腕，両手に装着し，ヘッドトラッキング付 HMD に提示される映像を見ながら操作を行っている．このため，作業操作時のメニューは HMD に提示される実写映像にスーパーインポーズするようにし，操作者は把持操作把持力提示装置の両手先に付いているスイッチを押してメニュー操作を行うしくみにしている．

4） 立体音響提示システム

立体音響提示システムでは，ロボットに搭載された三次元マイクあるいは耳殻付ミニマイクで集められた音を，ノイズ除去の後，音源定位情報に基づき，包囲型ディスプレイ周辺部に設置された 8 台のスピーカ，あるいはヘッドフォンを通じ，三次元音場として操作者に提示する．本システムの構成を**図 10** に示す．

また，コックピット内の操作者がロボット周辺にいる人と会話をしながら操作が行えるように，操作者の音声をマイクロフォンで集め，人間型ロボット胸部に設置されている小型スピーカで再生する機能も合わせて実現している．

5） 通信システム

人間型ロボットとスーパーコックピット間に，前出の図 2 に示すように，映像・音響情報・触力覚情報やロボットの内部状態情報とロボットの手足制御のための制御情報を伝送する必要がある．

映像・音響情報については，ロボットに搭載された広視野角カメラシステムからの 8 チャンネルの映像信号や両眼カメラからの 2 チャンネルの映像信号，さらにはロボットとコックピット間の双方向での音響情報が，アナログ無線あるいは光ファイバにより伝送される．

ロボットの手足などの各制御対象要素および触力覚などの各種センサ類と，スーパーコックピットの運動操作感覚

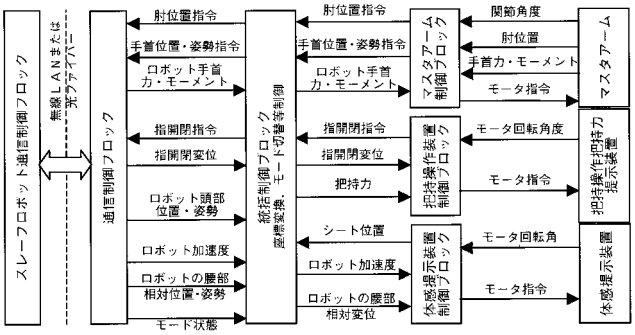


図 11　運動操作感覚提示システム機能ブロック図

提示システム（詳細は後述）との間の双方向制御情報は，リフレクティブ・メモリ（共有メモリ）＋デジタル無線 LAN により最大制御周期 20 [ms] 以下，あるいはリフレクティブ・メモリ＋光ファイバにより最大制御周期 5 [ms] 以下で伝送される．

また，遠隔ネットワーククライアントについては，前出の図 2 に示すように，インターネットなどの情報ネットワークを介してスーパーコックピット内に設置された RCML（R–Cubed Manipulation Language）サーバーと接続されるが，この間の情報伝送は，映像・音響情報については H.261 準拠方式，制御情報については RCML/RCTP 準拠方式 [2] で行われる．

2.3　運動操作感覚提示システム

運動操作感覚提示システムは，操作者がロボットに対して手腕操作や移動に関する動作指令を与えるとともに，力覚・体感などによってロボットがいる環境での臨場感を得るためのマスタシステムである．そして，前述の視聴覚情報提示・通信システムとともにスーパーコックピットを構成している [4][12]．

本システムは，ロボットに対して手腕の動作指令を与えるとともに操作者に力覚の提示を行うためのマスタアーム，把持操作や把持感覚の提示を行うための把持操作把持力提示装置，歩行感覚や上体の動きを提示する体感提示装置，および運動指令用の 3D マウスで構成されている．本システムの機能ブロック図を**図 11** に示す．マスタアーム，把持操作把持力提示装置，体感提示装置にはそれらを制御するための制御ブロックが接続され，各制御ブロックは座標変換や各機器のモード管理を行う統括制御ブロックに接続されている．統括制御ブロックは通信管理ブロックと接続され，無線 LAN あるいは光ファイバによってロボットと情報を通信する．

高臨場感でロボットに作業をさせる遠隔操作を行う場合，操作者は立った姿勢で体感提示装置に腰を掛け，HMD，マスタアーム・把持操作把持力提示装置を装着してスーパーコックピットを使用する．

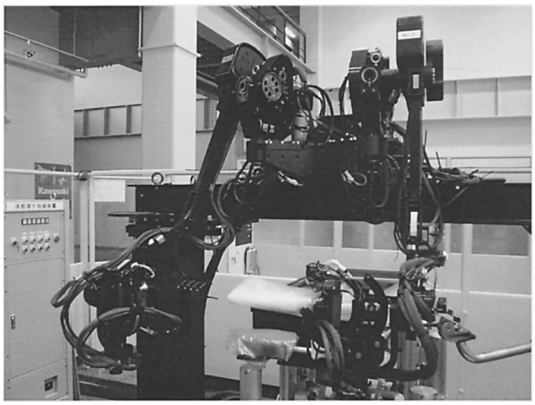


図 12　外骨格型 7 自由度双腕マスタアーム

以下では，これら運動操作感覚提示装置の各構成装置について詳細に説明する．

1）　マスタアーム

操作者が作業操作する場合，決められた動作パターンでロボットの手腕を動かすことができるだけでなく，自在に手腕の操作ができることが強く望まれる．このような要求を満たすべく，この運動操作感覚提示システムは，左右腕を自在に操作できる**図 12** に示すような外骨格型 7 軸の双腕マスタアームを有している．このマスタアームは，操作者の腕の外側から操作者にかぶさる形の 7 自由度を持つ外骨格型であるため，**図 13** に示すように，動作範囲を非常に大きく取ることが可能となっている．また，肘部を検出するセンサを有し，操作者の肘位置に追従して常に操作の障害にならないように回避するとともに，ロボットの肘位置に対する操作も可能にしている．さらに，手腕操作する上で有効である手首部での 6 軸力提示が可能である．肘の位置に対する操作は，肩位置と手首位置とを結ぶ線分を軸とする回転角を「肘角度」として定義し，この角度をロボットの肘位置指令の値として使用している．また，操作者の肘の動きを非接触の光学センサにより検出し，マスタアームと操作者の腕が干渉しないような形態をとるよう制御している [13]〜[15]．これら制御システムの概略ブロック図を**図 14** に示し，マスタアームの主な仕様を**表 5** に示す．

2）　把持操作把持力提示装置

操作者が作業操作を行う場合，ハンドの操作の役割は非常に重要である．この運動操作感覚提示システムは，ハンドの基本操作である把持操作を容易にするため，**図 15** に示すようなワイヤ張力方式の把持操作把持力提示装置がマスタアーム手首部に装備されている．この装置を用いて操作者は把持力を感じながら把持操作を行うことが可能である．この装置は，ワイヤの張力を利用して把持力の提示を行う方式を採用し，機構的にパッシブ回転ジョイントを設けた．これにより操作者の親指と人差し指の動作範囲全域において把持のための開閉動作が容易に指示でき，開閉時に

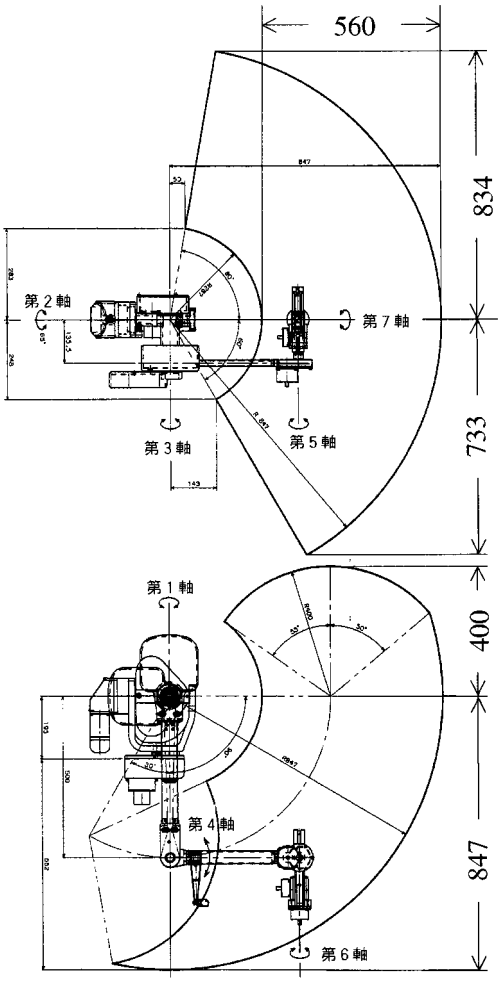


図 13 マスタアーム動作範囲

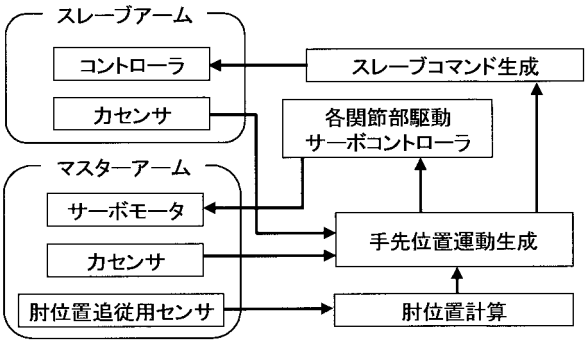


図 14 マスタアーム制御ブロック概略図

生じる把持力の提示ができる小型軽量な装置を実現している [12]．把持操作把持力提示装置の主な仕様を**表 6** に示す．

3） 体感提示装置

操作者が高い臨場感を持ってロボットの遠隔操作を行う場合，ロボットが移動中に受ける腰部の加速度や基準状態からの上体の動きを操作者に提示することが有効であると考えられる．運動操作感覚提示システムでは，このような体感が提示できる**図 16** に示すような体感提示装置を有している．この装置は，操作者が腰を掛ける部分を直線 3 軸方向に駆動し，体感が提示できるものである．一般のモーションベースでは回転運動を主に利用して，加速度を発生させたり，あるいは傾斜を利用して重力により加速感を発生させたりするといった手法がとられることが多い．しかし，本装置ではコックピットとして使用した場合にアイポイントの変位量が大きくなる回転運動を用いる方式は適していないことから並進 3 自由度（上下，前後，および左右の運動）を用いて体感を提示する方式を採っている．

表 5 マスタアーム仕様

形式	外骨格型（左右腕）
自由度	7 自由度（各腕）
速度	100 [mm/s] 手先最大値
提示力	10 [N] 瞬間最大値
重量	75[kg]（各腕）
関節動作範囲	JT1: -60～80[deg] JT2: -15～50[deg] JT3: -30～90[deg] JT4: -50～55[deg] JT5: -70～70[deg] JT6: -70～70[deg] JT7: -90～90[deg]

表 6 把持操作把持力提示装置仕様

自由度	能動 2（親指，示指） 受動 1（親指）
把持力提示方式	ワイヤ張力方式
提示力	5[N] 瞬間最大値
最大速度	800[mm/s]
重量	370[g]

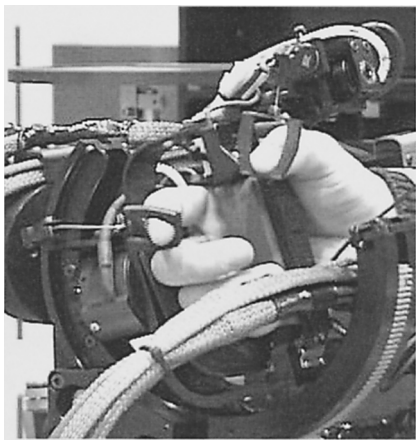


図 15 把持操作把持力提示装置

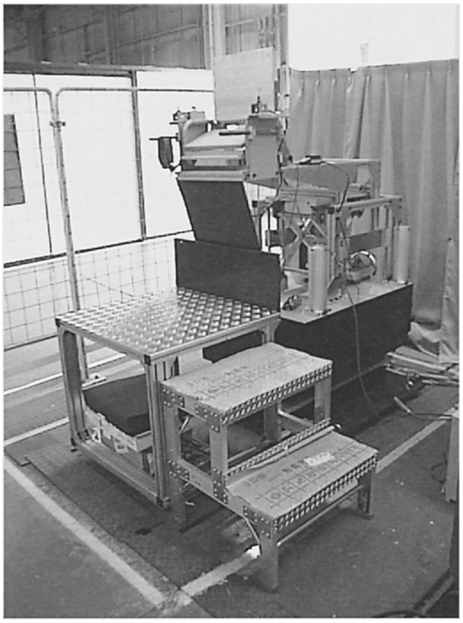


図 16　体感提示装置

表 7　体感提示装置仕様

X 軸(左右方向)	
駆動範囲	±75[mm] (150[mm])
駆動機構	リニアガイド付ボールスクリュー
アクチュエータ	AC サーボモータ 2[kw]
Y 軸(左右方向)	
駆動範囲	±100[mm] (200[mm])
駆動機構	リニアガイド付ボールスクリュー
アクチュエータ	AC サーボモータ 2[kw]
Z 軸(左右方向)	
駆動範囲	±100[mm] (200[mm])
駆動機構	リニアガイド付ボールスクリュー およびパンタグラフ機構
アクチュエータ	AC サーボモータ 5[kw] ブレーキ付き

また，予備実験による検討結果により，腰を深く掛けて座るような姿勢より，操作者が立ち姿勢で腰を浅く掛ける姿勢で操作する方が，地面から受ける反力により生じる脚の動きからもたらされる運動感覚により，高い臨場感が得られることが明らかとなったため，スーパーコックピットでは操作者が立ち姿勢で腰を浅く掛ける姿勢で操作する方式を採用した [12]．また，歩行時における加速度の提示に関して，操作者に提示する腰の動きはロボット腰部の加速度に適切なフィルタリング処理をすることにより高臨場感が得られるように構成している．体感提示装置の主な仕様を**表 7** に示す．

3.　ミニマムコックピット

ミニマムコックピットは，スーパーコックピットのような高臨場感は提供できないものの，簡易に人間型ロボットを操作できる遠隔操作プラットフォームである．ミニマムコックピット全体の概要を**図 17** に，システム構成を**図 18** に示す．

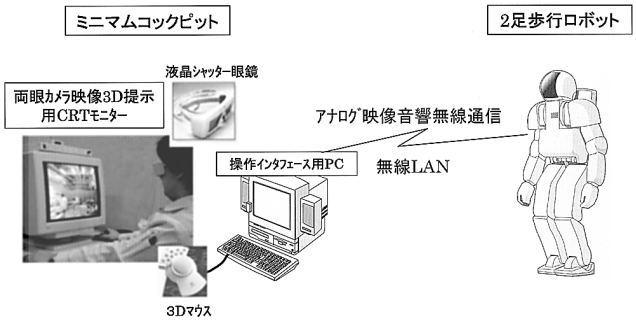


図 17　ミニマムコックピットの概要

スーパーコックピットとは異なり，視覚情報の提示は，ロボットに搭載されている両眼カメラからの映像のみである．その映像は 120 [Hz] 対応の立体モニタに提示され，操作者は液晶シャッタ眼鏡をかけることで立体視を行う．また，別途操作インタフェース用の PC を設け，3D マウスなどを用いてロボットの手腕制御を行う．操作支援のための制御ソフトウェアの構成は，スーパーコックピットにおける制御ソフトウェアに準じている．ミニマムコックピットとロボットとの間の通信方式については，スーパーコックピットで採用した方式と基本的に同様である．

4.　高機能ハンド 遠隔操作システム

4.1　システム構成

高機能ハンド 遠隔操作システムは，ロボット側の 4 指高機能ハンド（以下，スレーブハンド）を操作するシステムである．本システムの構成要素であるマスタハンドには，サイバーグラスプシステムを採用している．このシステムは，操作者の各指の関節角度を検出するセンサが接着されたグローブ部と，力覚を操作者にフィードバックするためのアクチュエータ部（グラスプ部）から構成されている．また，操作者の手の位置と姿勢を計測してロボットアーム制御をするために，トラッカーをサイバーグラスプに接続して使用した．さらに接触覚提示装置として振動モータを各指先に配置した．これらのシステムはコンピュータ（EWS）に接続され，データの入出力はイーサネットを経由して行われる．EWS はリアルタイム処理が可能な制御装置と接続され，この制御装置がマスタハンドから検出されたデータを指位置指令に変換し，スレーブハンドに指令する．スレーブハンドとマスタハンド制御装置にはリフレクティブ・メモリを搭載し，その間を光ケーブルで接続して通信を行った．**図 19** にシステム構成図を示す．さらに，以上のシス

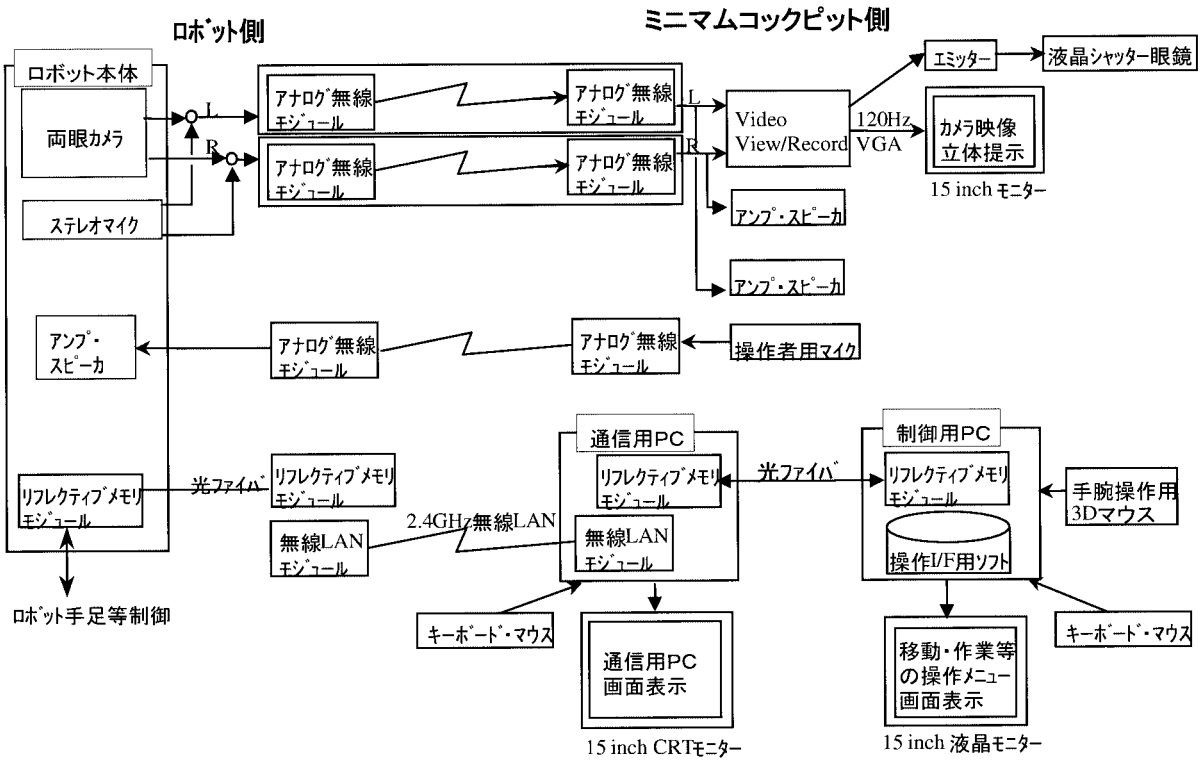


図 18　ミニマムコックピット構成図

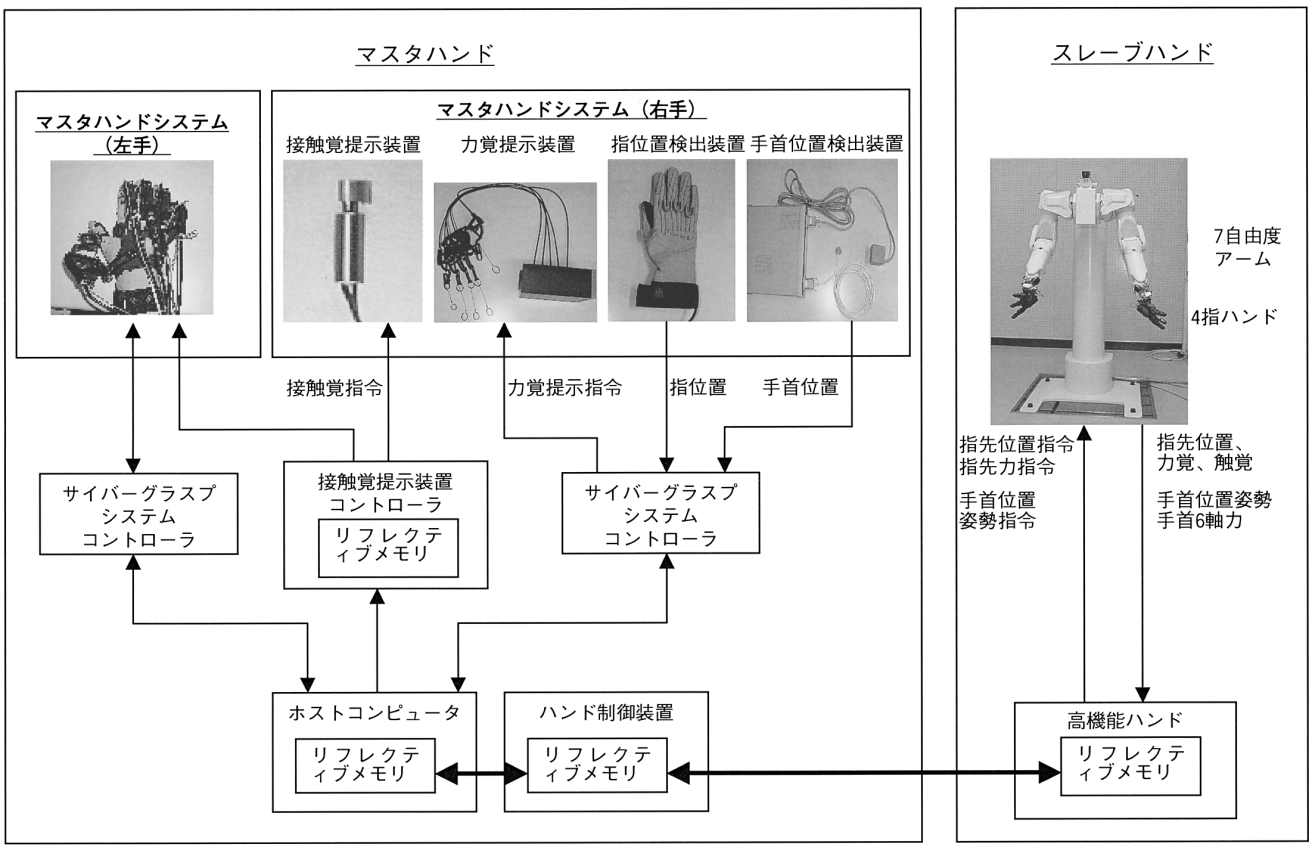


図 19　高機能ハンド遠隔操作システム構成図

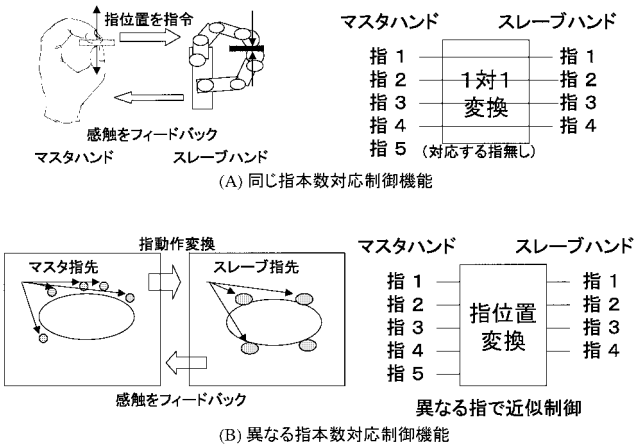


図 20　ハンド遠隔制御ソフトウェアの機能

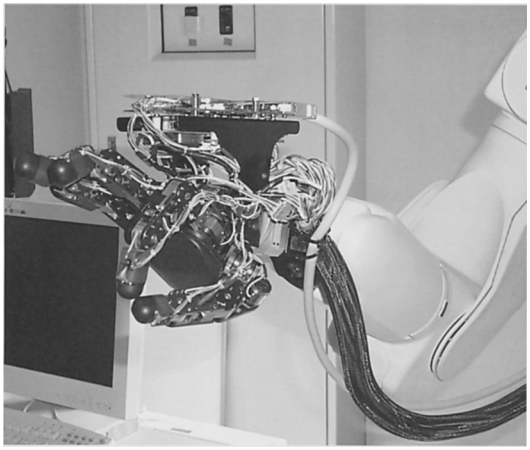


図 21　人差し指と親指を合わせた状態

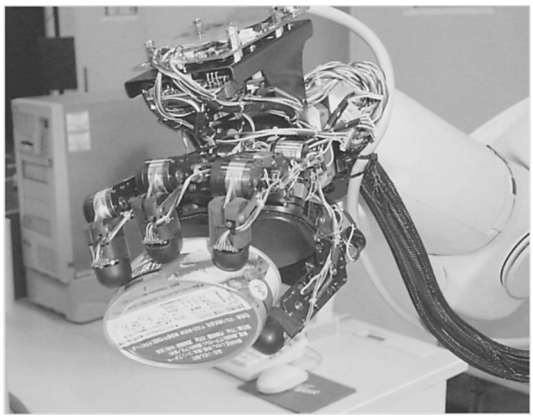


図 22　異なる指本数対応制御機能を使った把持動作

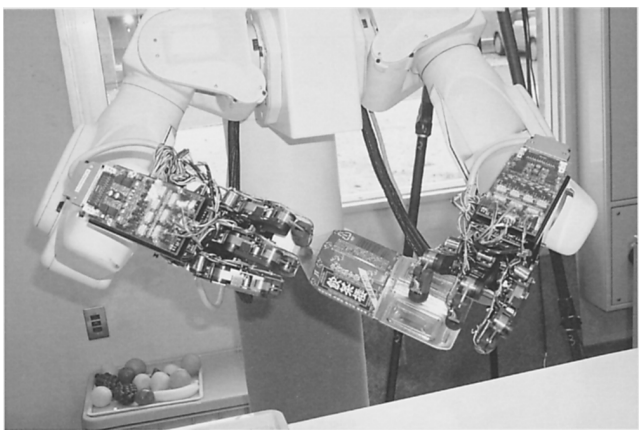


図 23　アーム制御による持ち替え動作

テムを制御するハンド遠隔制御ソフトウェアを開発してシステムの動作検証を行った．

4.2　ハンド遠隔制御ソフトウェア

マスタハンドとスレーブハンドの各指の構造は必ずしも同じ構造ではない．例えば，指の関節の数や大きさ，指の数，さらにはスレーブハンドの動作および仕様上の制約などがあり，操作者の意図した動作をスレーブハンドが行えない可能性がある．そこで，それらの構造上の違いがあっても操作者が意図する把持行為に対してスレーブハンドが把持動作を行える機能をもったソフトウェアを開発した．

1）　同じ指本数対応制御機能

同じ指本数対応制御機能は，マスタハンドとスレーブハンドの指を 1 対 1 に対応づけて制御を行う．特にマスタハンド側の指先を合わせた場合，スレーブハンドの合い対応する指先も合うように指令を行う機能を開発した．また，スレーブハンドの把持力を検出し，その把持力に応じた指令を操作者の手に装着した力覚提示装置にフィードバックすることによって臨場感のある把持動作を行う機能を開発した（**図 20** (A) 参照）．

2）　異なる指本数対応制御機能

異なる指本数対応制御機能は，マスタハンドのすべての指の情報を使ってスレーブハンドの指全体の制御を行う．マスタハンドの指先位置から指先が形作る形状にスレーブハンドの指先位置が沿うように指先位置を求め，その位置から指の各関節の角度を計算してスレーブハンドに指令する．この場合，操作者は 5 本の指すべてを使って操作を行う．また，把持物体に働く力からマスタハンド指全体に力覚をフィードバックする方法を開発した（図 20 (B) 参照）．

4.3　動作例

操作者の手に取り付けた三次元位置姿勢検出センサ（トラッカー）の情報をロボットアームの移動指令に変換し，操作者の手の動きに連動してアームを動作させながら遠隔把持動作を行うことができる．同じ指本数対応制御動作を用いて，操作者が指先を合わせたとき，**図 21** に示すように高機能ハンドも指先が合い，小さい物体が把持できる．一方，異なる指本数対応指制御動作を用いて，**図 22** に示すように，比較的大きい丸いものが把持できる．トラッカーを用

い，使用環境によってはデータが不安定な場合もあるが，ソフト的な処理をいれることで，アームの制御に使用できる．一例として**図 23** にペットボトルの持ち替え動作を示す．

5. 遠隔操作プラットフォームの統合試験

開発した遠隔操作プラットフォームの各構成要素についての機能検証試験の後，最終的に本プラットフォームを用いて人間型ロボットを遠隔操作した際に，人間協調共存環境において，どの程度のタスクが遂行可能かを確認するため，**図 24** に示すようなショッピングゾーンの環境（3.5 [m] × 6 [m]）を設定し，ロボット操作の統合試験を実施した．

具体的には，スーパーコックピットからショッピング環境に存在する人間型ロボットへテレイグジスタンスすることによって，自分の分身ロボットが階段昇降，その場旋回，前進，斜め歩行などを行い，図 24 に示した人間協調共存環境の中を移動し，その間に，縫いぐるみを持ち上げたり，ハノイの塔で遊んだり，扉付きのショーケースの中から缶コーヒーやスナック菓子などを取り出して買い物カートに入れ，カートをレジまで押して運んで行くといった作業を実行できる．また，高機能ハンド遠隔操作システムとミニマムコックピットを用いて，レジに配した固定式ロボットの 4 指高機能ハンドを遠隔操作し，買い物商品の箱詰め作業を行った．

人間型ロボットにテレイグジスタンスして移動（歩行）を行う際には，スーパーコックピット内の操作者は，**図 25** に示すように偏光眼鏡をかけて包囲型ディスプレイを見ながら操作を行う．包囲型ディスプレイの正面，左右面，下方面の計 4 面には，ロボットに搭載された広視野角カメラが捉えた立体映像が投影されており，操作者は高臨場感を持って，あたかもロボットの中に入り込んだような高度の臨場感を有して移動動作を行うことができる．このとき，前述のように，包囲型ディスプレイ左下面には移動操作のための操作メニューが，右下面には操作支援情報として，第 3 者の視点からのロボットの位置・姿勢や周囲環境が VR 映像として提示されている．

図 26 は，分身の人間型ロボットが階段を降りている状況である．このような階段昇降や歩行中の移動状況において，ロボットが受ける加速度や基準状態からの動きは，体感提示装置によって操作者に提示される．操作者はロボットの移動感覚を体感しながら移動動作を行うことができる．

図 25 スーパーコックピットでの移動操作

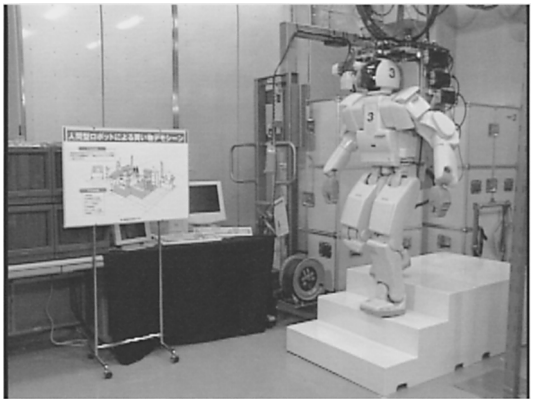


図 26 ロボット移動例（階段降り）

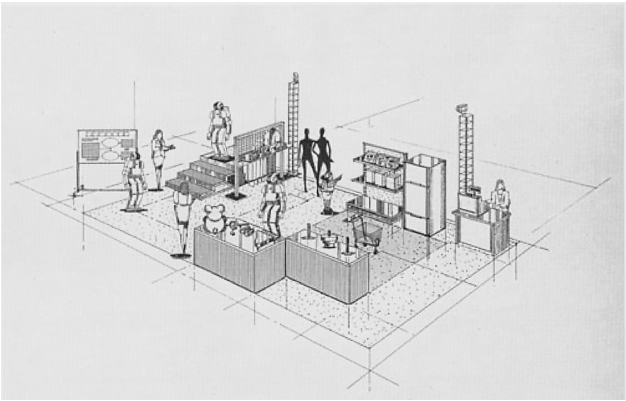


図 24 統合試験会場イメージ図

図 27 スーパーコックピットでの作業操作

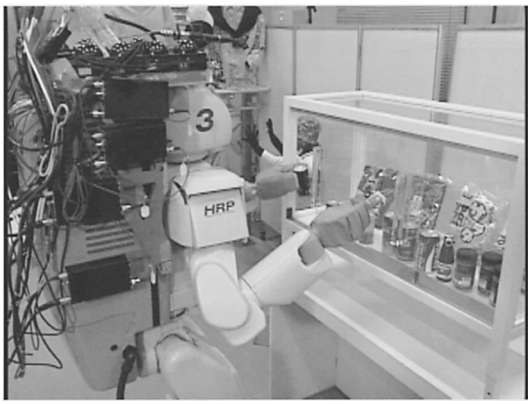


図 28　ロボット作業例（缶取り出し）

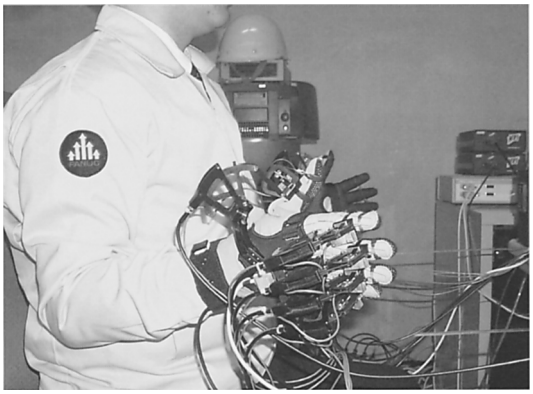


図 29　高機能ハンド遠隔操作システムの操作者初期姿勢

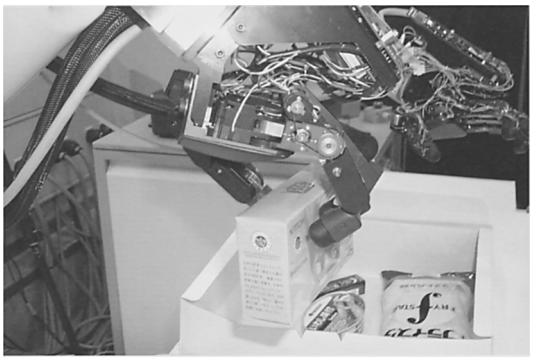


図 30　4 指高機能ハンド作業例（箱詰め作業）

作業操作の際には，操作者は**図 27** に示すようにマスタアームと把持操作把持力提示装置を両手腕に，ヘッドトラッキング付 HMD を頭部に装着して，ロボットのアームとハンドの位置や姿勢の制御を行う．**図 28** は，分身の人間型ロボットを使って，右手でショーケースの扉を開け，左手で缶コーヒーを取り出している状況である．これらの作業操作時には，ロボットのアームとハンドからの触力覚情報は，マスタアームと把持操作把持力提示装置にフィードバックされるため，操作者は物を掴んだり押したりする感覚を実際に感じながら手腕操作を行うことができる．

上記のような作業操作時においても，分身ロボットを移動させることが必要となる．操作者はマスタアームと把持操作把持力提示装置を両手腕に装着しているため，移動操作のときのようなマウス操作でロボットを移動させることは困難である．そこで代替手段として，本システムでは音声認識機能を組み込んでいる．すなわち，操作者は「三歩前」,「一歩右」などの音声コマンドにより，作業操作中でもロボットに移動指示を与えることができる．

一方，レジに設置された固定式ロボットの 4 指高機能ハンドを遠隔操作する操作者は，ミニマムコックピットの画面を見ながら，手に装着した前述のサイバーグラスプとトラッカーを操り，把持感触を確認しながら把持操作を行う．画面に映し出される三次元映像は，4 指高機能ハンドとアームで構成された固定式ロボットの頭部に設置されたカメラから送られる．装置を装着した操作者の初期姿勢を**図 29** に示す．動作実験では，数種類の大きさ，硬さ，形の異なる食料品（ガム，箱，パン粉，缶詰）の把持を行い，箱詰め動作を行った．**図 30** に箱詰め動作の様子を示す．

以上のような遠隔ショッピングを想定した人間協調共存環境におけるロボット操作の統合試験により，開発した遠隔操作プラットフォームの所定の機能を検証することができた．

6. お わ り に

本稿では，HRP において，テレイグジスタンス技術を導入して開発した遠隔操作プラットフォームについて述べた．すなわち，操作者の視聴覚や力覚機能を拡充し，あたかも人間型ロボットの場にいるかのような高臨場感遠隔操作を実現することをねらいとして開発したスーパーコックピット，およびスーパーコックピットのような高臨場感は提供できないものの，簡易に人間型ロボットを遠隔操作できるミニマムコックピット，およびロボットの 4 指高機能ハンドを操作する高機能ハンド遠隔操作システムについて概説した．また，遠隔操作プラットフォームを用いて，人間協調共存環境における遠隔ショッピングを想定して実施した人間型ロボットのテレイグジスタンス制御の統合試験例についても述べた．

遠隔操作プラットフォームは，HRP 前期 2 年の「プラットフォーム開発」の中で開発した成果であり，本年度からの後期 3 年では,「応用分野開発」として，プラント保守，対人サービス，建設・災害，屋外作業などの各分野において，人間型ロボットと遠隔操作プラットフォームによる応用研究開発が行われる予定である．これらの応用研究開発を通じて，今後の遠隔操作プラットフォームの機能が改良

され，機能の拡張がなされると期待されている．

最後に，本研究開発は，通商産業省工業技術院産業技術応用研究開発制度の一環として，新エネルギー・産業技術総合開発機構からの委託を受けて（財）製造科学技術センターが実施したことを，ここに付記する．

参 考 文 献

[1] S. Tachi, K. Tanie, K. Komoriya and M. Kaneto: "Tele–Existence (I): Design and Evaluation of a Visual Display with Sensation of Presence," Proc. of the 5th Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators, pp.245–254, 1984.

[2] 通産省アールキューブ研究会編：アールキューブ．日刊工業新聞社，1996. http://www.rcml.org/

[3] S. Tachi: "Real–time Remote Robotics–Toward Networked Telexistence," IEEE Computer Graphics and Applications, vol.18, no.6, pp.6–9, 1998.

[4] H. Inoue and S. Tachi, et al.: "HRP: Humanoid Robotics Project of MITI," Proc. First IEEE–RAS International Conference on Humanoid (Humanoid 2000), Boston, USA, Sept. 7, 2000.

[5] T. Nishiyama, H. Hoshino, K. Suzuki, R. Nakajima, K. Sawada and S. Tachi: "Develpoment of Surrounded Audio–Visual Display System for Humanoid Robot Control," Proc. 9th International Conference on Artificial Reality and Tele–existence '99, pp.60–67, Tokyo, Japan, Dec. 16, 1999.

[6] 星野，西山，仲島，澤田："包囲型ディスプレイの開発"，日本バーチャルリアリティ学会第 4 回大会論文集，pp.147–148, 1999.

[7] 星野，鈴木，西山，澤田："ロボット遠隔操作のための撮像・映像提示システムの開発—Humanoid Robotics Project におけるディスプレイシステムの開発—"，日本ロボット学会第 18 回学術講演会予稿集，pp.597–598, 2000.

[8] 澤田，星野，鈴木，西山："ロボットの遠隔操作に利用する新型ディスプレイシステムの開発"，画像ラボ，vol.11, no.9, pp.31–33, 2000.

[9] 舘，安田："テレイグジスタンス・マニピュレーション・システムの設計と評価"，電気学会論文誌 C，vol.115–C, no.2, pp.172–181, 1995.

[10] 西山，星野，鈴木，澤田，徳永，篠宮，舘："人間型ロボット制御のための遠隔操作コックピット向けユーザインタフェースの開発"，日本バーチャルリアリティ学会第 5 回大会論文集，pp.209–212, 2000.

[11] T. Nishiyama, H. Hoshino, K. Suzuki, K. Sawada, and S. Tachi: "Development of Visual User Interface Embedded in Tele–existence Cockpit for Humanoid Robot Control," Proceedings of IMEKO 2000, vol.XI (Topic 17 & ISMCR2000), pp.171–176, Vienna, Austria, Sept. 25–28, 2000.

[12] H. Hasunuma et al.: "Development of Teleoperation Master System with a Kinesthetic Sensation of Presence," Proc. 9th International Conference on Artificial Reality and Tele–existence '99, pp.53–59, Tokyo, Japan, Dec. 16, 1999.

[13] 小林政巳，他："力覚・運動感覚提示を伴うヒューマノイドロボット用遠隔操作装置"，日本ロボット学会第 18 回学術講演会予稿集，pp.599–600, 2000.

[14] 小林政巳，他："遠隔操作システムにおける力覚・運動感覚提示機能"，日本バーチャルリアリティ学会第 5 回大会論文集，pp.213–214, 2000.

[15] H. Hasunuma and H. Kagaya, et al.: "Teleoperation master arm system with gripping operation devices," Proc. International Conference on Machine Automation (ICMA'2000), pp.567–572, Osaka, Japan, Sept. 29, 2000.

舘　　暲（Susumu Tachi）

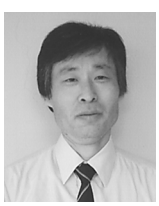
1968 年，東京大学工学部計数工学科卒業，1973 年，同大学大学院工学系研究科博士課程修了（工学博士）．東京大学助手，通産省機械技術研究所，バイオロボティクス課長，マサチューセッツ工科大学（MIT）客員研究員，東京大学先端科学技術研究センター教授などを経て，1994 年，東京大学工学部教授．現在，同大学大学院工学系研究科計数工学専攻教授．バイスペクトル分析，盲導犬ロボット，テレイグジスタンス，アールキューブなどの研究を行う．国際計測連合学会（IMEKO）ロボティクス会議議長，重点領域「人工現実感」領域代表，日本バーチャルリアリティ学会会長などを務める．（日本ロボット学会正会員）

澤田一哉（Kazuya Sawada）

1978 年，神戸大学大学院工学研究科システム工学専攻修了．同年松下電工株式会社に入社．現在，同社ウェル・ラボヒューマンメディア技術グループ主幹研究員．VR を中心としたヒューマンメディア技術の研究開発およびそれを応用した新商品・新システムの研究開発に従事．日本バーチャルリアリティ学会，ヒューマンインタフェース学会，システム制御情報学会，日本オペレーションズリサーチ学会，日本ファジィ学会の各会員．博士（工学）．

井上幸三（Kozo Inoue）

1988 年ファナック株式会社入社．電動式射出成形機の制御ソフトウェア開発研究と知能化を推進後，同社ロボット研究所に入所．1998 年より HRP に従事．



小森谷清（Kiyoshi Komoriya）

1974 年東京大学工学部機械工学科卒業．1976 年同大学大院工学系研究科修士課程（産業機械）修了．1976 年通商産業省工業技術院機械技術研究所入所．1986 年 8 月より 1 年間米国スタンフォード大学ロボティクス研究所客員研究員．1993 年博士（工学）．盲導犬ロボット，自律移動ロボットなどの研究に従事．現在，ロボット工学部感覚制御研究室長．日本機械学会，計測自動制御学会，IEEE などの会員．（日本ロボット学会正会員）

井床利之（Toshiyuki Itoko）

1976 年東京大学工学系研究科航空学専攻修士課程修了．同年川崎重工業株式会社に入社，以来，各種プラント，ビークル，およびメカトロ制御システムの研究開発に従事．技術士（情報工学部門）．1998 東京大学より工学博士取得．現在，AIAA，計測自動制御学会，日本機械学会，ヒューマンインタフェース学会の会員．