

ヒューマノイドロボットの遠隔操作システムにおける教示インターフェースの開発

Development of a Teaching Interface of Teleoperation System for a Humanoid Robot

臼井俊吾, 那須康雄, 金子慎一郎, 山野光裕, 水戸部和久

Shungo Usui, Yasuo Nasu, Shin-ichiro Kaneko,

Mitsuhiro Yamano, Kazuhisa Mitobe

山形大学

Yamagata University

キーワード: ヒューマノイドロボット(humanoid robot), 遠隔操作(teleoperation), 超音波位置検出システム
(ultrasonic positioning system), 動作軌道生成(motion trajectory generation)

連絡先: 〒992-8510 山形県米沢市城南 4 丁目 3 番 16 号 山形大学工学部機械システム工学科那須研究室
臼井俊吾, Tel.:0238-26-3237, Fax.:0238-26-3205, E-mail:ts016@dipfr.dip.yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

現在ヒューマノイドロボットの研究は盛んに行われている。なぜなら、ヒューマノイドロボットは人間の身体的特徴を持つことから、人間との共存が求められ、家庭や職場等といった人間の生活空間や作業空間への導入が求められているからである。さらには、人間の立ち入ることの出来ない危険な環境や災害現場で人間の代わりに働くことが期待されている。これらの過酷な環境で働くため、ヒューマノイドロボットには様々な移動方法(歩行, 匍匐等), 障害物の乗り越え, 障害物の排除など, 多種多様な洗練された動作が必要となる。しかしながら, ロボットが自立的に作業を行う場合にはまだまだ不安が残る。綿密に計画された動作だとしても, 現実の状況は不定だからである。そして結果次

第ではロボットを破損させ失う危険性がある。また, ロボットが自己の視覚を頼りに判断し作業する場合, 判断の遅れが生じる。これに対し, 遠隔操作システムによって, オペレータがロボットの周囲状況を確認し, 適切な動作を判断し, 指令を行うことで危険を回避し円滑に作業する動作を教示することができる。また, ヴァーチャル・リアリティ(VR)アプリケーションの実行によって, オペレータがよりロボットの立場に立って手元の動作を指令すること出来, 素早い操作が可能となる。そこで本研究では, 超音波位置検出システムを応用した, VR インターフェースを有するヒューマノイドロボットの遠隔操作システムにおける教示インターフェースを提案する。

VR におけるインターフェースでオペレー

タの全関節の動作をトレースするとユーザ・インターフェースの複雑化・肥大化を引き起こしてしまう．そこで本研究では手元で動作をすることに特化し，それに必要な手先の動作軌道に注目している．その入力機構として，超音波位置検出システム¹⁾を応用し採用している．比較的簡易なセンサシステムを比較的安価で構成できるという特徴を持つ．

2. 遠隔操作システム

本システムのコンセプトは，オペレータの動作を直接入力するといった VR インターフェースに基づいている．その流れを伴った遠隔操作の概要は Fig. 1 に示す．

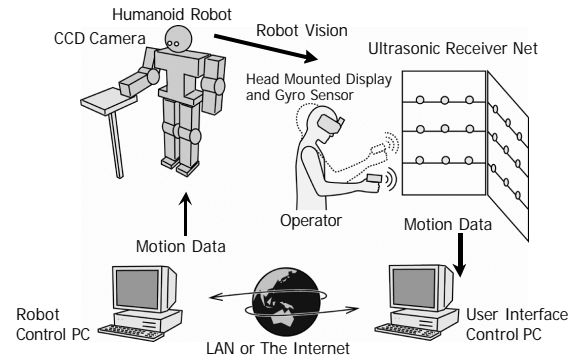


Fig.1 Schema of Teleoperation system

まず，オペレータが動作を計画する．計画した動作の手先位置は超音波位置検出システムを用いて変位データとして検出される．検出された変位データは CORBA を用いて LAN やインターネットを通して，ユーザ・インターフェース・コントロール PC からロボット・コントロール PC に送られる．送られた変位データを基に軌道が生成され，ロボットは動作を行う．ロボットの動作の様子はジャイロセンサを搭載したヘッド・マウント・ディスプレイ(HMD)を装着したオペレータが確認することが可能となっている．最後に，オペレータは確認したロボットとの動作を基に再度動作を計画する．その際，動作の種類を変更したい場合，動作の切り替えを行う．

2.1. 超音波位置検出システム

超音波位置検出システムは，超音波受信ネットと送信機，コントロール PC から成る (Fig. 2) ．

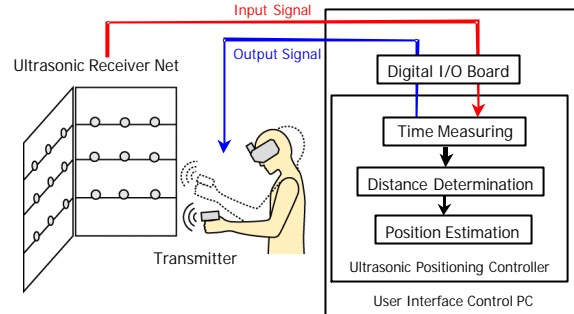


Fig. 2 Configuration of Ultrasonic Positioning Controller

変位データの検出にはまず，送信機の位置を検出する．コントロール PC から送信機に信号を送り，受信機が音波信号を感知して入力信号をデジタル I/O ボードに送るまでの伝達時間を測定する．三つ以上の受信機から入力信号を得た段階で，送信機の位置を求める．ある室温(t [])での音速(V [m/sec])は既知である為(式(1))，伝達時間を計ることで送信機 $T(x, y, z)$ と受信機 $R_i(x_i, y_i, z_i)$ ($i=1,2,3$)の距離を決定することが出来る．3つの受信機の位置が既知である場合，送信機の位置は幾何学的に求めることが出来，次の様な連立方程式(2)で算出する (Fig. 3) ．

$$V = 331.5 + 0.6 \times t \quad (1)$$

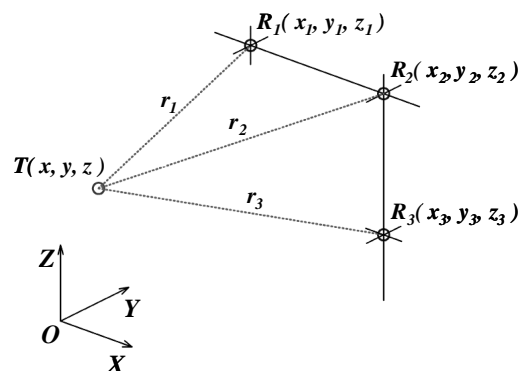


Fig. 3 Estimation of Transmitter Position

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} = r_1 \\ \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} = r_2 \\ \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} = r_3 \end{cases} \quad (2)$$

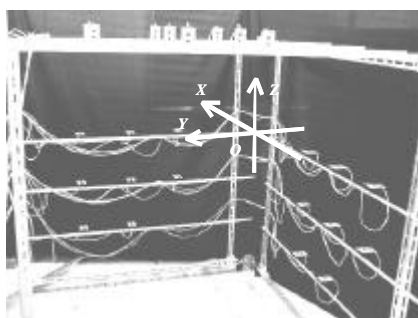
ここで、

$R_i(x_i, y_i, z_i)$: 受信機の既知の位置

r_i : 送信機から受信機までの距離

($i = 1, 2, 3$)

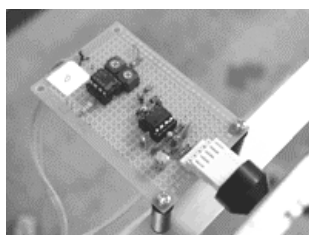
送信機の以前位置は記憶されており、算出された位置と比較して、変位データを算出する。本研究で実際に変位データを算出する場合、八つの受信機を配置している。本来は、送信機の計測範囲に三つの受信機が入れば十分である。しかし、送信機には指向性があり計測範囲に限りがある為、広域で計測出来るように1つの面に八つの受信機を格子状に配置している。また、一つの面だけを用いて計測すると、送信機の姿勢の変化により概算された位置のデータが乱れてしまう。この問題を避け、正確なデータを得る為、お互いが直交する三つの面と三つの超音波センサ素子を取り付けた送信機に用意した。Fig. 4 は超音波受信ネットとその座標軸を示した概観図となっている。高さ、幅、奥行きは、それぞれ 1500 [mm] となっている。受信機は 300 [mm] 四方の間隔をあげて配置している。



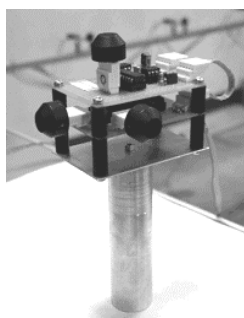
Height : 1.5 [m]
Width : 1.5 [m]
Depth : 1.5 [m]

Fig. 4 Ultrasonic Receiver Net and its coordinate system

また、送信機と受信機の概観図はそれぞれ Fig. 5 に示す。



(a) Receiver



(b) Transmitter

Fig. 5 Overview of Receiver and Transmitter

超音波センサ素子は株式会社村田製作所の MA40E7R/S が使われている。超音波センサ素子の諸元は Table.1 に示す。ユーザ・インターフェースのコントロール PC の CPU には Celeron(233MHz)が使われていて、OS には Linux を使用している。

Table. 1 Technical specifications for MA40E7RS electrostatic transducer

	Receiver	Transmitter
Nominal frequency	40 [kHz]	
Minimum receiving sensitivity	-74 [dB]	--
Minimum transmitting sensitivity	--	106 [dB]
Beam angle	100 [deg]	
Capacitance	2200 ± 20% [pF]	
Maximum voltage	85 [V _{p-p}]	
Operating conditions Temperature	-30 ~ 85 [°C]	
Measuring range	0.2 ~ 3 [m]	
Resolving power	9 [mm]	
Cover size	18(D) x 12(H) [mm]	
Weight	4.5 [g]	
Character	Waterproof	

2.2. 通信

検出された変位データがユーザ・インターフェース・コントロール PC からロボット・コントロール PC に通信される。その際、両 PC 間の接続に CORBA[®]が用いられている。本研究で使用されている CORBA は、米国の Xerox 社製の ILU Ver2.0 である。ユーザ・インターフェース・コントロール PC、ロボット・コントロール PC それぞれにインストールされている。Fig.6 はオペレータ側の PC とロボット側の PC との通信の関係を示している。CORBA のクライアントとサーバーは CORBA で定義されたプロトコルにより通信する。クライアントはタスクコマンドと目標動作データ(手先変位データ、頭部現在角データ)をサーバーに送る。タスクの

周期が終了したとき,サーバーはタスク結果をクライアントに返す.

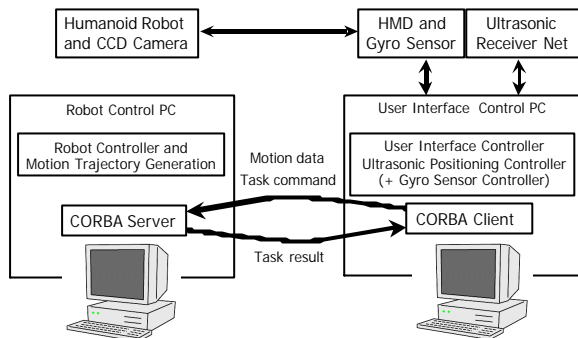


Fig. 6 Communication between User Interface Control PC and Robot Control PC

2.3. 動作軌道生成

超音波位置検出部によって検出された変位データを基に軌道は生成される.このとき,ロボットの手先位置の座標は肩関節を原点としている.変位データに現在のロボットの手先位置を加えた目標データ,過去手先の位置を保存しておいたデータ,現在の手先位置データ,以上三つのデータから,スプライン補間により生成される.その際,作業空間と胴体接触について判定する.作業空間と胴体接触でエラーが生じる場合,新たな通過点と目標点がセットされ,元々の3つのデータに新たな目標点を加えたデータから,新たにスプライン補間によって軌道が生成される(Fig.7).最後に,逆運動学によって手先軌道角度データは算出される.

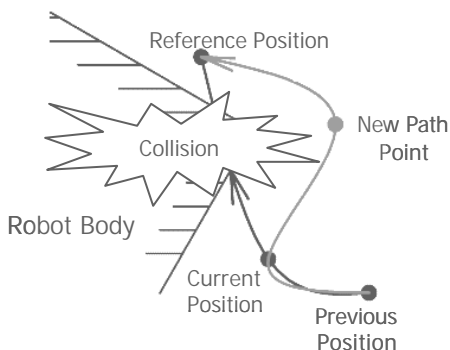


Fig.7 Generating reference hand tip trajectory

2.4. HMD部

オペレータはロボットの動作の様子を確

認するためにジャイロセンサを搭載したHMDを装着する.ジャイロセンサを搭載したHMDは, Fig. 8に示す.

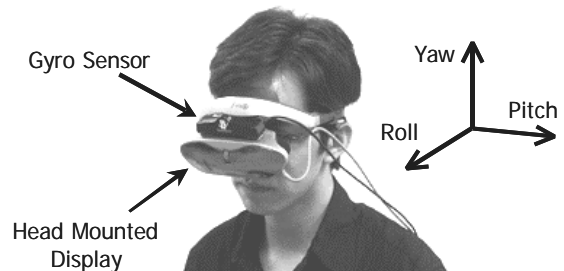


Fig. 8 Head Mounted Display and Gyro Sensor

HMDは米国のPersonal Display Systems社製でi-Visor DH-4400VPである.144万画素のLCDの0.49インチモニタでSVGAのグラフィックモードをサポートしている.重量は155[g]である.ジャイロセンサは米国のInterSense社製でInterTrax²である.角速度と角加速度を除いたピッチ,ロール,ヨーの現在角を測定すること出来,オペレータとロボットとの連動が可能となっている.最小分解能は0.02[deg]である.重量は39[g]である.HMDはアナログ・コンポジット・ビデオケーブルによって,ロボットに搭載されているCCDカメラから直接繋がる.

2.5. 動作の切り替え

動作の種類を切り替えたい場合,動作の切り替えを行えるように動作切り替えスイッチを用意した.また,動作を切り替えの際,動作を円滑に行えるような軌道を生成する.

2.5.1. 動作切り替えスイッチ

実際にオペレータが操作する際には,HMDを装着する為,オペレータ自身の手元が見えず,コントロールPCのコンソールを操作が難しくなる.そこで,オペレータが手先を見ずに動作の切り替えが出来るよう,オペレータが持つ送信機のグリップ部に動作切り替えスイッチを取り付けた.スイッチ(ON-OFF-ON)は今後の拡張性を考慮し三つ取り付けた.スイッチは切り替えることによ

って、四つの動作(右腕動作, 左腕動作, 両腕が左右対称に動く左右対称動作, 両腕が一定の間隔を開けたまま平行に動く左右並行動作)が可能となる(Fig.9). 各スイッチへの割り当て及びグリップの概観図は Fig. 10 に示す.

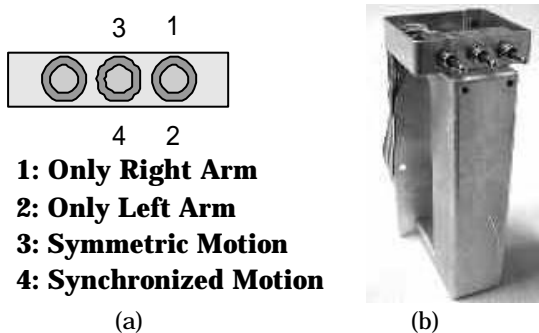
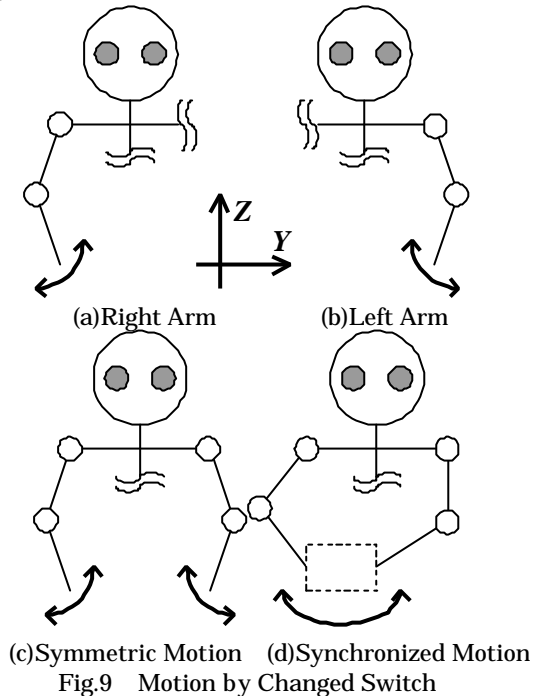


Fig.10 Assignment of Switch and Switch part

2.5.2. スイッチ切り替え時の軌道生成

スイッチの切り替え時には, 使用しない方の腕は初期位置に移動し, 使用する方の腕はオペレータの指令する位置に移動する方法を取っている. スイッチの切り替え時に使用しない方の腕を現状の位置に留める方法も考慮してみたが, 現状の位置に留めておくと両腕の手先が接触する危険性がある. そこで安全性を重視し, 使用しない方の腕は初期位置に移動する方法を取った.

オペレータの動作を再現する際, 軌道生成

の処理を簡易にする為, 超音波位置検出システムから与えられる一つの送信機(片腕分)の変位データのみを用いている. つまり, 片腕分の変位データのみで, ロボットは両腕を動かす, オペレータの動作を再現しなければならない. その為, 手先位置は各腕の各肩関節を原点とした座標系をとり, 左右の腕は同じ手先軌道になるようにしている. この状態で四つの動作を行えるようにする為, 一部を変更した変位データを左右の腕に与えている. 動作の切り替えによって与える変位データは Table.2 に示す.

Table.2 Given Data of Assignment Switch

Assignment	Axis	X	Y	Z
	Right		X's Ref	Y's Ref
Left		X's Ref	Y's Ref	Z's Ref
Symmetric	Right Arm	X's Ref	Y's Ref	Z's Ref
	Left Arm	X's Ref	- Y's Ref	Z's Ref
Synchronized	Right Arm	X's Ref	Y's Ref	Z's Ref
	Left Arm	X's Ref	Y's Ref - O	Z's Ref

Ref: Reference Data
O: Offset

右腕動作, 左腕動作の場合には, そのまま目標変位データの値を入れることで, オペレータの動作を再現する. 左右対称動作の場合には, 左腕に変位データの Y 成分に符号を変えた値を与えることで, 左右の手先が開閉の動作を行う. 左右並行動作の場合には, 左腕に変位データの Y 成分から一定空間分を引いた値を与えることで, 左右の座標系の違いである肩幅から定量分狭まった状態を保ち並行な動作を行う.

3. ヒューマノイドロボット "Bonten-Maru"

本研究で使用されているヒューマノイドロボット, "Bonten-Maru" の概観図と自由度配置を Fig. 11 に示す. また, Fig. 12 にロボット・コントロールシステムを示す. ロボットは3自由度を持つ2つの腕, 6自由度を持つ2つの脚, 2自由度の首, 胴体を回転させ

る腰を有する．高さ 1.25[m]，総重量 32[kg] となっている．全ての関節はロータリーエンコーダを取り付けた DC サーボモータからハーモニックドライブ減速機によって減速され駆動する．また，制御には Linux (CPU: Celeron 2.4[GHz])を用いた PC を使用している．PC とロボットへ電力を供給するモータドライバはロボットの外部に設置されている．サンプリング周波数は 200[Hz]．頭部には二つのモノクロ CCD カメラが搭載されている．

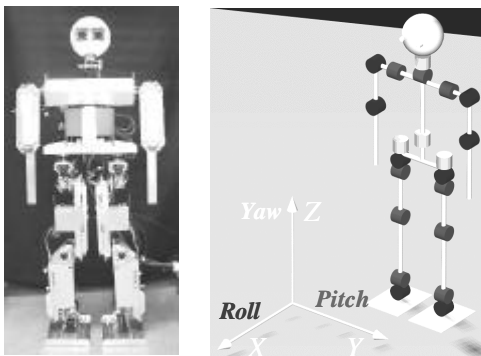


Fig. 11 Humanoid Robot “Bonten-Maru” and its joint configuration

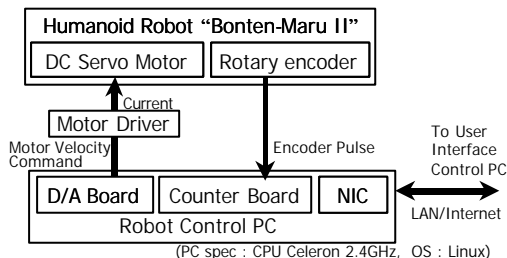


Fig. 12 Control system of Humanoid Robot “Bonten-Maru”
(PC spec : CPU Celeron 2.4GHz, OS : Linux)

4. 実験

本研究では，提案したシステムを用いたヒューマノイドロボット “Bonten-Maru” の予備実験を行った．オペレータによって生成された手先動作をロボットの手先が再現しているかについて評価した．本実験では，オペレータがオンラインで連続的な動作を計画している．

例として，オペレータが超音波受信センサネット内の Y-Z 平面内に手先で四角形をなぞる動作の計画をした．オペレータが手先を

動かすと，ロボットの手先はオペレータの動きを追った．このとき，オペレータはHMDを装着し，ロボットからの画像によって，ロボットの手先が移動する様子を確認した．確認した動作が四角形をなぞるように，オペレータ自身の手先を動かした．実験を行った部屋の温度は 27[]であった．ロボットの動きの連続写真を Fig.13 に示す．

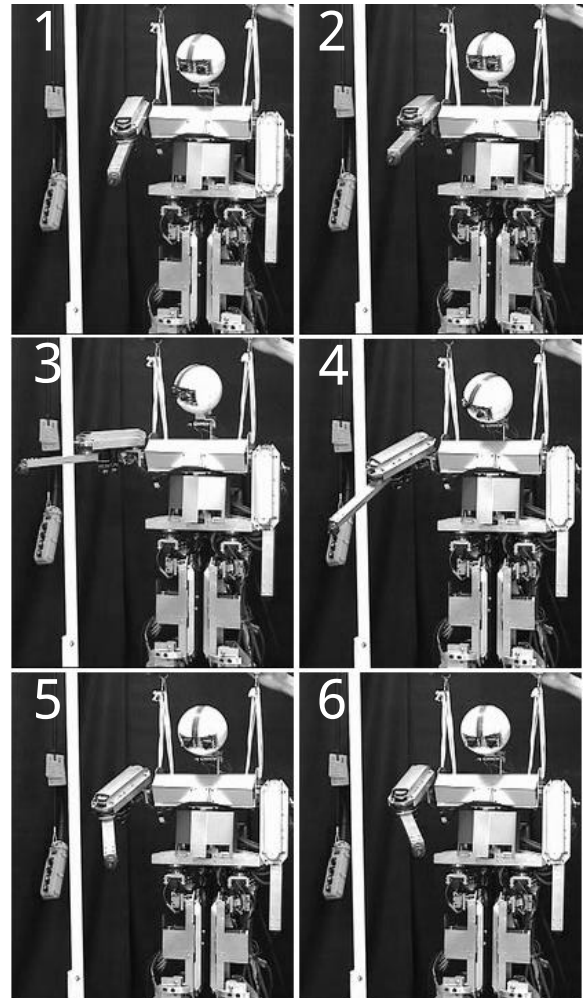
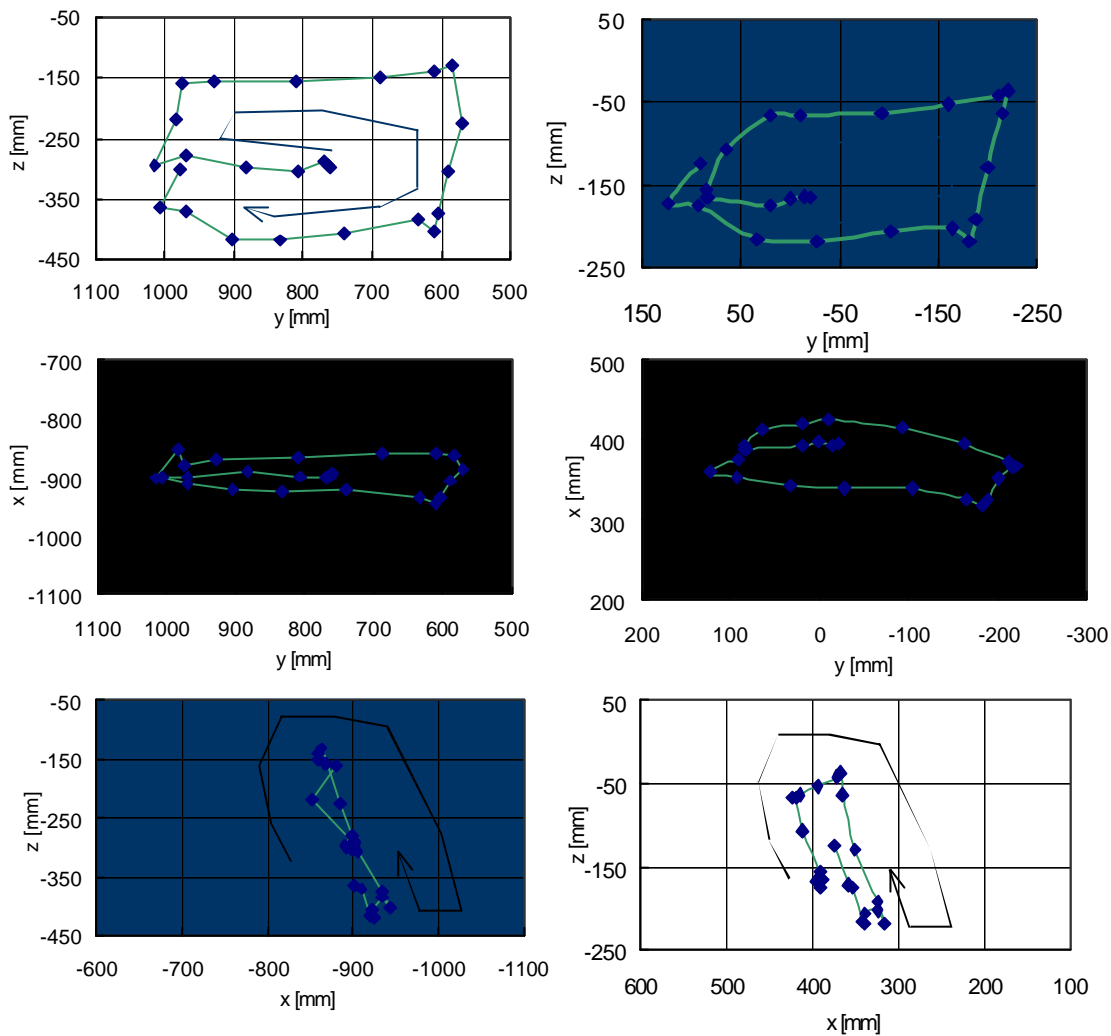


Fig.13 The robot motion during the experiment

Fig.14 の(a)と(b)に，超音波受信ネットで得たオペレータの手先軌道と，右肩の座標原点から見たロボットの手先位置の測定結果を示す．また Fig.14 で，矢印方向は動作の方向を示し，各点は行動中の測定位置を示している．各点の間隔は動作の 1 周期分を表していて，超音波受信ネットの測定時間とロボットの動作時間とネットワーク通信での時

間遅れを含んで 1.5[sec]となっている。



(a) Measured operator hand tip position (b) Robot right hand tip position

Fig.14 results of the experiment

Fig.14 の(a)と(b)の目盛の違いは、オペレータ ロボット間の違いの考慮して、目標データを 70%減衰させることにより生じる。

Fig.14 の(a)と(b)の間には、軌道パターンにおいて、多少の相違がある。なぜなら、ロボットの手先軌道は、動作軌道生成において、行動範囲の限界、稼動範囲、胴体接触により訂正されるからである。二つの軌道パターンは類似している。また、オペレータ自身は HMD を装着している為に手先を肉眼で確認出来ないが、オペレータが指令する動作は四角形になっている。これは、オペレータが HMD の画像のみを用いて自身の手先の

位置を訂正し、動作したといえる。言い換えると、ユーザ・インターフェースは、オペレータがロボットとデータを共有することが出来る VR インターフェースとして機能したといえる。

5. おわりに

ヒューノイドロボットの遠隔操作システムにおける教示インターフェースを提案した。また、超音波位置検出システムを応用した入力機構を採用し、VR インターフェースを構築した。そして、ヒューノイドロボット “Bonten-Maru” 用いて動作実験を

行い,提案したシステムを評価した。オペレータが直感的に計画された動作を,ロボットが再現出来ることから,遠隔操作システムによる教示インターフェースは有用である。

今後は教示インターフェースの向上に注目し,状況に応じた動作に対応した機能を増やしていく予定である。

参考文献

- 1) 兪 竹青,那須康雄,中嶋新一,水戸部和久:超音波センサネットを用いた広範囲位置検出システムの開発,精密工学会誌,67(2001)5,764-769
- 2) Takeda, K.J. and Ruh, W.a. Inside CORBA: Distributed Object Standards and Applications, Addison-Wesley, Reading, MA, 1997.