

ヒューマノイドロボット遠隔操作システムにおける 操作支援ユーザーインターフェースの開発

A Development of an Operation Assist User Interface for a Humanoid Robot Teleoperation System

○金子 慎一郎*, 白井 俊吾**, 山野 光裕*, 那須 康雄*, 水戸部 和久*

○Shin-ichiro Kaneko*, Shungo Usui**, Mitsuhiro Yamano*, Yasuo Nasu*, Kazuhisa Mitobe*

*山形大学工学部, **株式会社 Spansion Japan

*Yamagata University, **Spansion Japan Ltd.

キーワード : ヒューマノイドロボット (humanoid robot), 遠隔操作 (teleoperation),
ユーザーインターフェース (user-interface), 超音波 3D マウス (ultrasonic 3D mouse)

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 渡辺克巳
研究室 金子慎一郎, Tel: 0238-26-3238, Fax: 0238-26-3205, E-mail: tr140@dipfr.dip.yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

ヒューマノイドロボットはその形態が人間に類する存在であるが故, 人間の活動環境に対して潜在的親和性を有し, 人間が容易に立ち入れない災害現場や発電プラントのような極限環境などへの導入に大きな期待が寄せられている. 一方で実際の導入にあたって, 遠隔操作によりオペレータが直接指令を与える必要性を考慮しなければならない.

オペレータが円滑に指令を行うためには, 指令入力作業が容易で, またそれに伴うオペレータへの負担が少ないユーザーインターフェースが求められる. その仕様として, ロボットが置かれている周囲の状況をストレス無く把握でき, また指令入力を直感的に行えること, さらにシステムの保守・開発が低コストであることが望まれる. ヒューマノイドロボットの遠隔操作を対象とする

ユーザーインターフェースとして, バーチャルリアリティ (VR) 技術を応用し, 外骨格型フォースフィードバック・マスターアームを装備したスーパーコクピットシステム¹⁾ や, 市販ゲーム用ジョイスティックを用いた簡素なユーザーインターフェース²⁾ などが開発されている. しかしながら, これらの例は操作性を求めればシステム構成の複雑化・高コスト化を, 逆に簡素かつ低コストにシステムを構成すれば操作性の低下を招くこと示している.

ヒューマノイドロボットの遠隔操作において, 三次元で位置および速度の入力が可能であることが直感的な入力操作を実現するための一要素であると考えられる. その身近な入力デバイスの例として PC マウスがある. GUI デスクトップ上の二次元平面での操作ではあるが, マウスポインタとマウスの動きが連動すること理解して

いれば、特別な訓練も必要とせずに位置と速度を無意識に使用することができる。本研究ではヒューマノイドロボットの手先を操作対象とし、その動作指令デバイスとして、PC マウスと同様な操作感を有し三次元入力可能な超音波 3D マウスを開発した。またジャイロセンサ搭載ヘッドマウントディスプレイ(HMD)およびカメラ映像の送受信システムを組み合わせ、VR インターフェースを構成した。

本論文では開発したユーザーインターフェースの詳細について述べる。さらに開発したユーザーインターフェースを用いてヒューマノイドロボット Bonten-Maru II の遠隔操作実験を行い、その評価について述べる。

2. 操作支援ユーザーインターフェース

本研究におけるユーザーインターフェースの開発方針は、オペレータの動作をそのまま指令動作として取り込み、且つロボットの視点をオペレータが共有する VR インターフェースを目標とする。また指令対象をヒューマノイドロボットの両腕手先位置とする。

開発したユーザーインターフェースは手先軌道入力用の超音波 3D マウスシステム、オペレータの頭部姿勢検出およびロボットのカメラ映像を投影するためのジャイロセンサ搭載 HMD、またカメラ映像の送受信を行うためのライブストリーミングシステムからなる。超音波センサを利用することにより、安価に 3 次元位置計測システムを構築できる。またジャイロセンサを用いてオペレータとロボットの頭部姿勢を連動させることにより、カメラの視点操作をごく自然な形で行うことが期待できるため、オペレータへの負担を軽減できる。

2.1. 超音波3D マウスシステム

超音波 3D マウスシステムは超音波送信素子を搭載した超音波 3D マウス(以下、マウス)と、

超音波受信機を同一平面上に等間隔の格子状に並べた超音波センサネット(以下、センサネット)、およびコントロール PC (DOS/V コンパチ PC (Pentium III 733MHz), OS:Linux)からなる。Fig.1, 2 はマウスおよびセンサネットの概観である。マウスには指令動作入力開始用トリガと、動作モード切り替えスイッチ(後述)が取り付けられている。また、手に負担が懸からないように軽量となっている。センサネットの受信機配置間隔は 300[mm]とし、Fig.2 中の座標軸はセンサネット内の座標系を表す。トリガを引いている間にマウスの軌跡が計測され、指令手先軌道を生成する。オペレータ-ロボット間での初期位置合わせを考慮することなく即座に指令入力作業を開始でき、PC マウスと同様な感覚でかつ三次元で操作することができる。

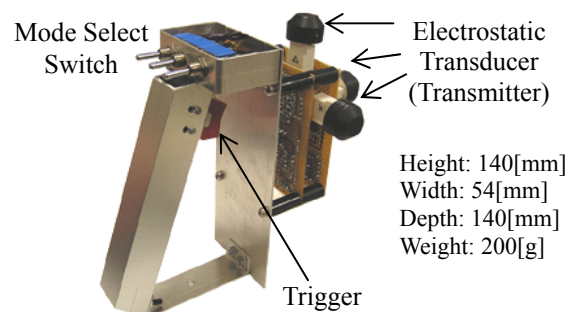
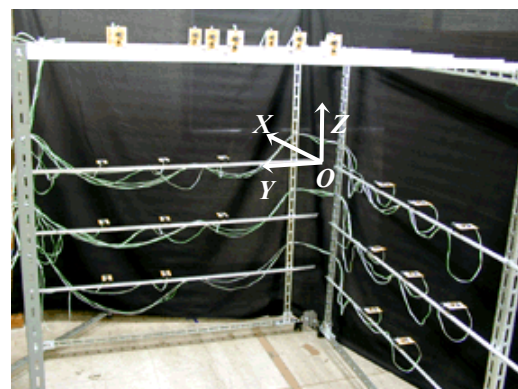


Fig.1 Ultrasonic 3D mouse



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

Fig.2 Ultrasonic sensor net

2.1.1 位置計測の原理

位置計測は超音波送受信機間の距離を計測し、三角測量の原理に従って送信機の位置を

求めるものである³⁾.

任意の座標系におけるマウスの座標を $P=(x, y, z)$ とし, 同一平面上に並べられた受信機の座標を $R_i=(x_i, y_i, z_i)$ ($i=1,2,3$)とする. 室温 T [$^{\circ}\text{C}$]とし, 音波の伝播時間 t_i ($i=1,2,3$) [sec]を計測すれば送受信機間の距離 L_i ($i=1,2,3$) [m]は次式で求めることができる.

$$L_i = (331.5 + 0.6 \times T) \times t_i \quad (1)$$

少なくとも一直線上にない 3 つの受信機と送信機間の距離が得られれば, 式(2)の連立方程式を解くことによってマウスの位置が得られる (Fig.3).

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 = L_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 = L_2^2 \\ (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2 = L_3^2 \end{cases} \quad (2)$$

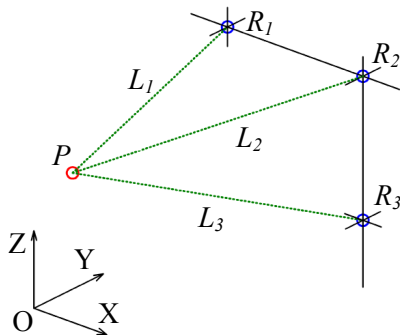


Fig.3 Position estimation

2.1.2. 位置計測システム

Fig.4 は位置計測からロボットに送信する指令動作データ生成までの流れを示す. 音波の発振信号を発すると同時に, 時間計測プロセスを開始する. センサネット上の受信機が音波を受信すると, 受信信号をコントロール PC に返し, その時点での時間を格納する. およそ 4[msec]経過後, 時間計測プロセスを終了し式(1)を基に送受信機間の距離を算出, 式(2)に代入しセンサネット内におけるマウスの座標を算出する. 一回あたりのサンプリングに要する時間は 10[msec]である. ある時刻に得られた位置データを時系列に沿って移動平均処理を施し格納する. これはノイズや受信機の特性のばらつき

などにより, 得られた位置データが不安定なためである. 次に, マウスのトリガ入力を判別し, 最新の位置データと 1 サンプリング前の位置データとの差分をロボット手先の指令手先軌道として生成する.

時間計測は CPU の周波数をベースにソフトウェア上で行うが, その 1 サンプリングあたりの分解能は平均で 250[kHz]であり, 室温 20[$^{\circ}\text{C}$]において位置計測分解能は理論値で約 1.3[mm]である.

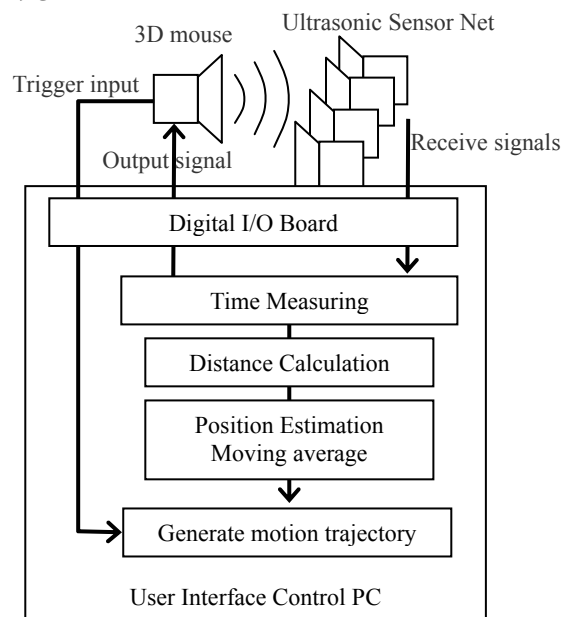


Fig.4 Diagram of ultrasonic positioning controller

2.1.3. 操作支援オプション機能

HMD を装着した場合, オペレータの手元はその視界から遮られる. このため, キーボード操作などは極めて困難になることから, 遠隔操作で必要最低限と考えられる動作モードを想定し, これを切り替えるスイッチを取り付けてある. またロボットの歩行移動を指示するために, マウスの軌跡パターンを識別して移動コマンドを入力するジェスチャー入力機能を実装している.

設定されているモードは指令対象である腕の左右切り替え, 両腕の同時に指令(左右並行動作, 左右対称動作) (Fig.5), およびジェスチャー入力モードである. またジェスチャー入力モードにおけるマウスの軌跡パターンと移動コマ

ンドとの対応を Fig.6 に示す.

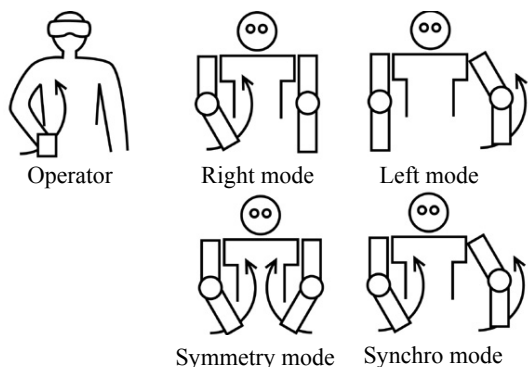


Fig.5 Operation mode

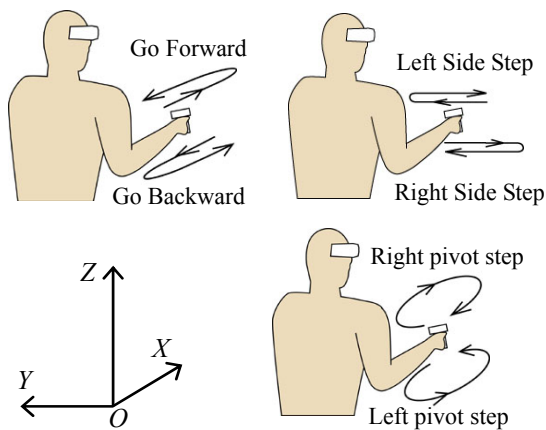


Fig.6 Gesture patterns corresponding to locomotion commands

2.2. HMD およびライブストリーミングシステムの概要

HMD は様々な製品が市販されているが、長時間の使用を前提としてオペレータへの身的負担ができるだけ少なくなるように選定する必要がある。本研究では HMD の重量と、表示解像度について考慮した結果、HMD に米国 Personal Display Systems 社製の i-Visor DH-4400VP を採用した。本体重量 155[g]、表示最大解像度は SVGA (800×600) をサポートし、民製 AV 機器や PC との接続が容易という特徴を有する。またジャイロセンサも同様に軽量で、かつドリフトが少ないものを選定し、米国 Inter Sense 社製の Inter Trax² を採用した。本体重量 39[g]、Roll, Pitch, Yaw の 3 軸について分解能 0.02[deg] で計測できる。Fig.7 は HMD とジ

ャイロセンサの概観である。

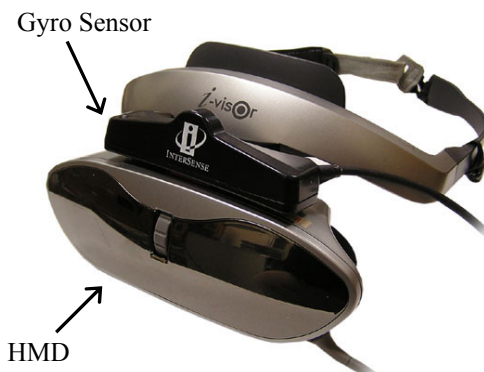


Fig.7 HMD with gyro sensor

ライブストリーミングシステムはライブストリーミングサーバ PC (DOS/V, Pentium IV(2.53GHz), OS: Windows XP SP1) とそのクライアント PC (NotePC, Pentium M(900MHz), Windows2000 SP4) からなり (Fig.8), ロボットのカメラ映像を、ネットワークを通じてオペレータへリアルタイムで送信する。カメラ映像はサーバ PC 内のアナログビデオキャプチャボードによりキャプチャされ、MPEG4 フォーマット形式 (MS-MPEG4 V2, QVGA (320×240)) にソフトウェアによってリアルタイムエンコードされる。サーバおよびクライアントアプリケーションに OpenNIME Web⁴⁾ サイトで配布されている“着目点の多地点間での遠隔共有ツール FocusShare”⁵⁾ の DirectShow フィルタ (Multicast server, Multicast client) を利用している。

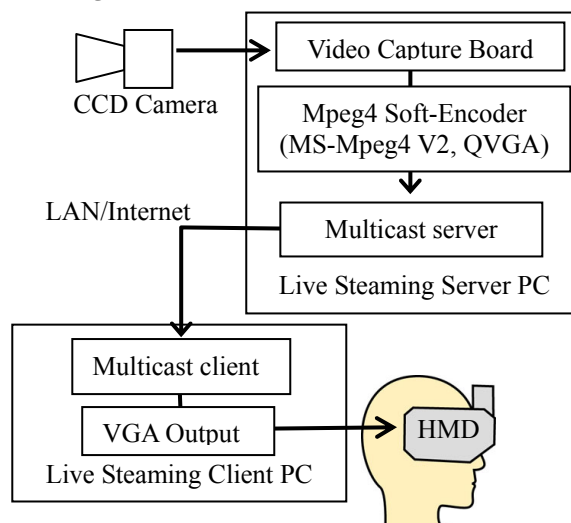


Fig.8 Configuration of live streaming system

3. 実験

本研究では開発したユーザーインターフェースについて、マウスの位置計測評価実験、およびヒューマノイドロボット Bonten-Maru II の遠隔操作による総合評価実験を行った。

3.1. 超音波 3D マウスの位置計測評価

超音波 3D マウスシステムにおける位置計測精度の評価実験を行った。Fig.9 は初期位置 -750[mm]中心として x 方向におよそ ± 100 [mm] で往復させた時の計測結果である。マウスの動きを十分に計測できていることがわかる。但し、過去 15 回分のサンプリングデータについて移動平均処理を施すため、およそ 0.2[sec]の遅れを生じている。この遅れが大きいほどオペレータ-ロボット間の同期をとる上で障害となり、操作性低下を引き起こすため今後改善しなければならない課題の一つである。

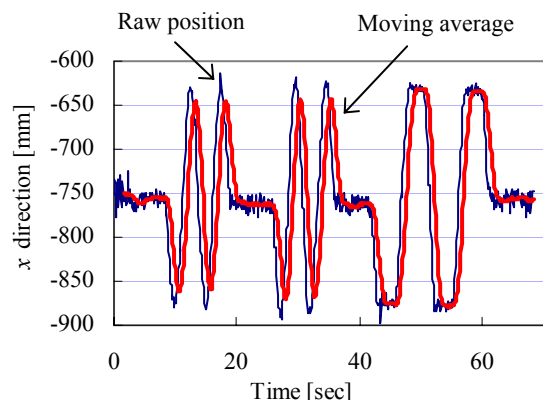


Fig.9 Measurement result of x direction

3.2. ヒューマノイドロボット Bonten-Maru II の遠隔操作による総合評価

Fig.4 は開発したユーザーインターフェースを用いて遠隔操作するヒューマノイドロボット “Bonten-Maru II” の概観とその自由度配置である。本ロボットは片足 6 自由度、片腕 3 自由度、頭部 2 自由度および腰部 1 自由度の計 21 自由度を有している。高さ 1.25[m]、全重量 31.5[kg]であり、頭部には 26 万画素カラー CCD

カメラを 2 基、また両腕手先には 6 軸力覚センサを搭載している。各関節はハーモニックドライブを介して DC サーボモータによって駆動、速度指令で制御する。制御用 PC (Celeron 2.4GHz) の OS は Linux を採用している。オペレータ-ロボット間の通信は LAN (100BASE-T) 経由で行われる。

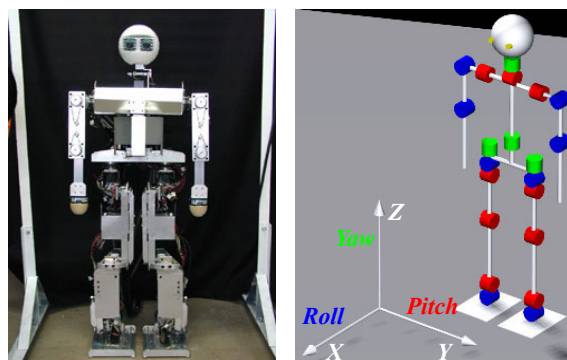


Fig.10 Humanoid robot Bonten-Maru II and joint location

次に Bonten-Maru II に対して行った遠隔操作実験について述べる。

3.2.1. 手先軌道指令

Fig.11 はユーザーインターフェースを介し、ロボットの右手先に対して前方に四角形の軌道を与えた時の様子である。オペレータは HMD より状況を確認しながら指令手先軌道を与えている。

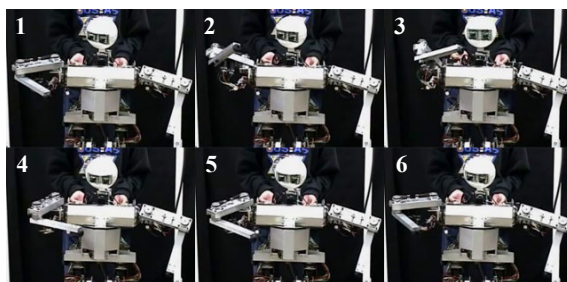
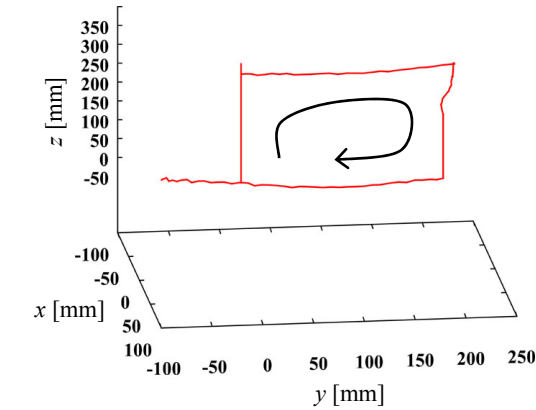


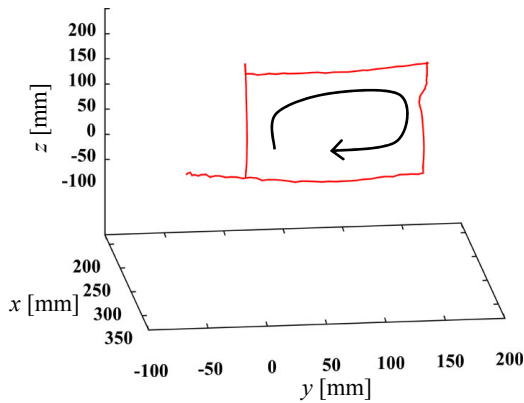
Fig.11 Video capture of right arm teleoperation

Fig.12(a), (b)はそれぞれこの時のマウスの軌跡とロボットの右手先の軌跡である。マウスの軌跡はマウスより生成された指令軌道データを逐次積算したものである。これに対して、ロボットの手先軌跡のスケールが若干小さいが、これは

動作速度の制限により、ロボット側で指令軌道が修正されたためである。しかしながら、オペレータの意図した指令どおりロボットが動作していることがわかる。



(a) Ultrasonic 3D mouse trajectory



(b) Robot hand tip trajectory

Fig.12 Result of right arm teleoperation

次にマウスを用いて、どの程度まで詳細な手先の指令が可能かを検証するため、ロボットの手先にペンを取り付け、ホワイトボードに文字を描く実験を行った。

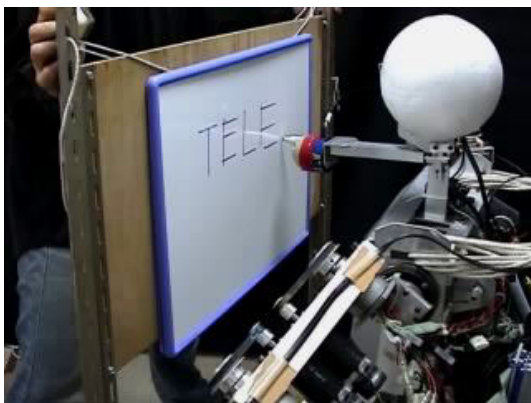


Fig.13 Result of drawing words by teleoperation

Fig.13 はその様子を示し、マウスを用いて認識できる文字を描かせることが可能であることを確認した。しかしながら微細な指令入力では、斜線や曲線が不安定になることや、マウスの位置計測処理における時間遅れの影響が顕著に現れるなど、操作性が低下したため描ける文字の種類に制限がある。

3.2.2. 物体への接近とアプローチ

ロボットの手先位置入力の他に、超音波3Dマウスシステムのジェスチャー入力機能を用いて、総合的な遠隔操作実験を行った。オペレータはHMDを通して周囲を確認、ターゲット(箱)までの移動コマンド(前進・旋回など)を指示し、さらにロボットの手先位置を操作してターゲットに触れるオペレーションである。Fig.14 はその様子を示す。ロボットのスタート地点、ターゲットまでの距離などはオペレータに知らせず実験を行ったが、HMDのカメラ映像から状況の判断により適切な歩行・方向転換指示を与えることができ、ターゲットに触れるために手先動作を適切に指令することが可能であった。以上の実験により、開発したユーザーインターフェースが有効に機能していることが確認された。

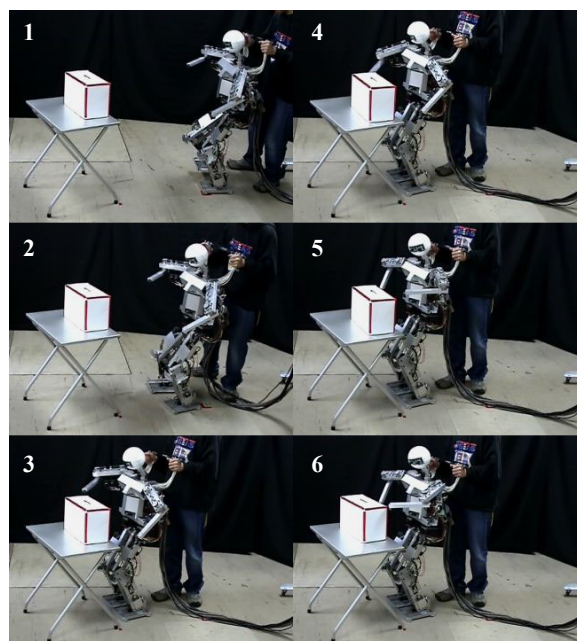


Fig.14 Video capture of teleoperation experiment

4. おわりに

本研究ではヒューマノイドロボット遠隔操作システムにおけるユーザーインターフェースとして、超音波 3D マウスシステムを開発し、HMD, ライブストリーミングシステムを組み合わせ、VR インターフェースを構成した。これらを用いて、ヒューマノイドロボット Bonten-Maru II の遠隔操作実験を行い、その有効性を確認した。

一方で、実験を通して位置計測精度、位置データ処理に関する時間遅れの問題が明確化し、操作性低下を招いていることも確認した。今後は、超音波 3D マウスシステムにおける位置計測精度の向上を図り、さらなる操作性向上を目指す。

参考文献

- 1) H. Hasunuma, et al., "A Tele-operated Humanoid Robot Drives a Lift Truck," in Proc. of 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2246–2252.
- 2) Neo, Ee, Sian., Yokoi, K., Kajita, S., Kanehiro, F., Tanie, K., Whole Body Teleoperation of a Humanoid Robot -Development of a Simple Master Device using Joysticks-, Proc. Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems(IROS), 2002
- 3) 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
- 4) OpenNIME Web Site: <http://open.nime.ac.jp/>
- 5) Multipoint Remote Focus-Sharing Tool: FocusShare
<http://www.nime.ac.jp/~osawa/focusShare/>