人間型ロボットのための遠隔操縦システムの開発

—人間型ロボットによる産業車両の代行運転への適用—

蓮 沼 仁 志^{*1} 中 嶋 勝 己^{*1} 小 林 政 巳^{*2}
御 船 文 里^{*1} 宮 原 啓 造^{*1} 鷹 取 正 夫^{*1}
森 山 尚^{*1} 家 中 良 太^{*1} 横 井 一 仁^{*3}

The Development of a Remote Control System for a Humanoid Robot —The Application of a Humanoid Robot for driving of Industrial Vehicles—

Hitoshi Hasunuma^{*1}, Katsumi Nakashima^{*1}, Masami Kobayashi^{*2},
Humisato Mihune^{*1}, Keizou Miyahara^{*1}, Masao Takatori^{*1},
Hisashi Moriyama^{*1}, Ryota Ienaka^{*1} and Kazuhito Yokoi^{*3}

A human operator can operate a robot intentionally using remote control devices. Therefore, the remote control system has the advantages that the robot can work according to the circumstances. We applied it to tele-operation of a humanoid robot that drives industrial vehicles. We have developed remote control devices that can be transported easily near the robot and remote control methods to operate the whole body of the robot, which consist of supervisory control method and master-slave control method and the operator select them suitable for the situation. For the evaluation, the tele-operated humanoid robot:HRP-1S could succeed in driving a rift truck in a standing posture and driving a backhoe in a sitting posture.

Key Words: Humanoid Robot, Remote Control System, Tele-Operation

1. は じ め に

近年、人間型ロボットの研究開発が盛んに行われている [1]～[6]。人間型ロボットは、人間のような外観を備えていることから対人親和性も高く、2足歩行することで人間が行動する環境を改造することなく移動でき、手を使った作業を行える。産業用ロボットは、人間の生活環境から隔離された工場内での自動作業が主な使用目的であったが、人間型ロボットは、今後到来する高齢化社会の中で、人間と共存する環境下で利用できる次世代ロボットのホープとして期待が大きい。しかし、現状の人間型ロボットの適用先は主に研究教育分野、エンターテインメント分野に限られている。これは、現在の人間型ロボットの運動能力では人間並みの作業を達成できないばかりでなく、認識判

断能力も様々な環境下で作業を遂行するには不十分であることに起因していると思われる。

経済産業省・NEDOでは、人間型ロボットの実作業への適用可能性を探索する目的で「人間協調・共存型ロボットシステムプロジェクト (Humanoid Robotics Project, 略称HRP)」を、1997年から5年間に渡り実施した [7]。本プロジェクトでは、前期2年間に研究開発の共通基盤となるプラットフォームを開発し、後期3年間で五つの応用分野での実用化を促進する応用研究開発を行った。HRPの応用分野の一つである「産業車両等代行運転分野」では、人間型ロボットが直接作業を行うのではなく、産業車両を人間と同じ要領で操作することにより、作業を遂行することを目指した [8]。産業車両を運転することにより、人間型ロボットは自身の運動能力の拡大を図り、人間並みの作業を行うことができるからである。しかし、認識能力の欠如は補えないため、人間型ロボットの操作には、遠隔操縦システムを適用することとした。

遠隔操縦システムは、海中や宇宙空間、原子炉内など人間が直接作業できない場所での作業を行うロボットの操縦方法として、これまで数多く研究開発されてきた [9]。筆者らも、これまで等慣性マスタアームの開発 [10]、水中マニピュレーションシステムの開発 [11]、パラレルリンクマニピュレータの開発 [12]

原稿受付 2003年5月9日

^{*1}川崎重工業 (株)

^{*2}新エネルギー・産業技術総合開発機構

^{*3}産業技術総合研究所知能システム研究部門

^{*1}Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

^{*2}New Energy and Industrial Technology Development Organization

^{*3}Intelligent Systems Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

において、遠隔操縦システムの研究開発を行ってきた。遠隔操縦システムは、人間が直接作業指示を行うので、状況に応じた臨機応変な対応ができる。このため、人間型ロボットの自律化を図っていく上においても、通常作業時に発生した異常状態からの回復手段や、自律制御プログラムを作成する前にそもそもロボットの機構が所望の動作を実行できるかどうかを実際に確認する手段として利用可能である。

筆者らは、HRP 前期において、操作者への高度な臨場感の提示に重点を置いた人間型ロボットの遠隔操縦システム「スーパーコックピット」を開発している [13]。そこで、スーパーコックピットを用いて、産業車両の代表的な運転姿勢の一つである「立ち姿勢」で運転できる「立ち姿勢運転型フォークリフト」の人間型ロボットによる代行運転を実施した [14]。

しかし、スーパーコックピットでは、立ち姿勢での作業実行を前提として開発されており、着座動作や、歩行以外の足動作の遠隔操縦は実行できず、産業車両のもう一つの代表的な運転姿勢である「着座姿勢」で運転する「着座姿勢運転型バックホウ」の代行運転には適用できなかった。また、近年通信技術の進歩から遠隔地との通信帯域も広がっているが、通信時間遅れが遠隔操作性を低減することを考慮すると、産業車両の代行運転のような状況が刻々と変化するような作業では、操作者の安全性と快適性が確保される範囲で、できるだけ現場に近い場所に遠隔操縦システムを設置することが望ましい。すなわち、遠隔操縦装置には可搬性が必要であり、この点からもスーパーコックピットは不适当であった。

そこで、我々は新たな人間型ロボットの遠隔操縦システムを研究開発した。これに際しては、人間型ロボットは、人間同様、様々な作業ができることを目標に開発されているため、産業車両の運転だけでなく、付随作業である周辺の探索や車両の点検・修理などを行うことも可能である点に注意して、産業車両を運転する人間型ロボットの遠隔操縦システムの開発ではなく、人間型ロボットの汎用的な遠隔操縦システムの開発を目指し、その機能を人間型ロボットの一つの応用である産業車両の代行運転により確認することを目標とした。

本論文では、新たに開発した人間型ロボットのための遠隔操縦装置と、それを用いて産業車両の代行運転を円滑に行うための遠隔操作手法について述べる。特に、全身同時動作や操作者の負担軽減のために開発した操作手法の有用性について、産業車両の遠隔操縦実験によって示す。まず、第2章で開発した遠隔操縦装置のハードウェア構成を示す。第3章では開発した遠隔操縦システムの四つの基本機能をスーパーコックピットと比較しながら示す。さらに、第4章で遠隔操作手法の検討内容、第5章で実証実験と実験から得られた遠隔操縦システムへの知見を、それぞれ示し、第6章でまとめる。

2. 遠隔操縦装置のハードウェア構成

新たに開発した遠隔操縦装置の構成は、操作者の手で操作するマスタアーム、操作者の足で操作するマスタフット、ロボットに搭載されたカメラからの視覚情報を操作者に提示する三次元視覚提示ディスプレイ、操作情報を提示するグラフィックス・ユーザ・インタフェース (GUI) 提示ディスプレイ、および、視

覚処理装置、マスタアームの制御装置とした。遠隔操作装置の全体構成を Fig. 1 に示す。

遠隔操縦装置は可搬性を重視してユニット構成とし、マスタアームは 20 [kg] 以下、制御装置は 1 ユニット 15 [kg] 以下の五つのユニットに分割でき、それぞれ一人で持ち運べるようにした。

以下、開発した遠隔操縦装置の主な構成要素であるマスタアームとマスタフットについて述べる。

2.1 マスタアーム

スーパーコックピットのマスタアームは外骨格型の 7 自由度であり、完全な相似型ではないが、ロボットの腕に近い形状であった。しかし、外骨格型とするため大型となり、重くなってしまう。そこで、新たに開発したマスタアームでは、軽量化のために 6 自由度異構造とした。マスタアームの手首機構は、操作者がトルクと力を区別して感じる事が容易であるように設計した [15]。また、ダイレクトドライブ型モータやバランス重りを導入し、力／トルクの提示性能が高い「感度のよい」マスタアームを実現した。さらに、マスタアームの把持部には手腕操作用のトリガスイッチと、機能切り替えや指示操作用の 5 方向スイッチを配置した。Fig. 2 にマスタアームの全体図を示す。

2.2 マスタフット

マスタフットは、操作者の足首位置で遠隔操作するための装置である。足首位置の検出には、シェイプテープ (Measurand 社製, S1280CS) を使用している。シェイプテープは長さ約 2 [m] のテープ状をしており、先端から約 50 [cm] までの範囲で位置と姿勢が計測できる。そこで、テープ先端を足首に固定し、テープの途中 (計測可能部分の端) を基準位置に固定することで、足

Fig. 1 Portable remote control system

Fig. 2 Master arm

Fig. 3 Master foot

首の位置を計測するようにした。テープ状であるので、軽量かつ、足の動きを拘束することもないのが特長である。なお、足は手と違い微妙な力感覚に欠けるため力提示は行わないこととした。Fig. 3にマスタフットの使用状態を示す。

マスタフットはテープ状であるため、方向により精度が異なる。そこで人間型ロボットが着座時に足を動作させる上下前後方向に精度が高い設置方向を選択するとともに、三次元計測によるキャリブレーションを行い、左右60[mm]、前後150[mm]、上下90[mm]の計測範囲で±5[mm]以下の計測精度を得ている。

3. 遠隔操縦システムの基本機能

人間型ロボットの遠隔操縦システムにおいて、重要な要素は「臨場感」と「自己投射性」である。「臨場感」とは、人間の知覚認識能力を生かすために、ロボットの作業現場の状況を操作者に分かりやすく伝えることである。また「自己投射性」とは、ロボットの動かし方を操作者自身の経験から直接的に理解して、操作者の作業スキルを生かすことである。人間型ロボットは、その形態が人間と相似であるがゆえに、操作者の知覚認識能力や経験的な動作技能を直接利用できる利点がある。

開発した遠隔操縦システムでは、「臨場感」に関しては、操作者の知覚認識能力を生かすために用いる「操作者に現場の情報を与える機能」によって実現し、「自己投射性」に関しては、操作者の手腕操作によってロボットの動作を指示する「操作者の手腕による操作機能」、操作者にロボットや操縦装置の情報を提示し、操作者が操縦方法を選択するために用いる「操作情報を提示／入力する機能」、操作者の手腕操作とは別に同時に操作してロボットの動作を指示する「手腕操作と同時に他の部位を操作する機能」によって実現した。

以下、スーパーコックピットと比較しながら、開発した遠隔操縦システムにおける各機能の実現方式について示す。

3.1 操作者に現場の情報を与える機能

遠隔操縦作業では、操作者がロボットの作業環境の状況を把握し、動作の判断を行う。そのため、操作者に環境の情報を伝えることは重要である。特に、人間の知覚情報の大部分を占める視覚情報は遠隔操縦をする上で必要不可欠である。また、聴覚情報の提示／入力は、視覚情報だけではわからない作業環境との接触検知や、作業現場での意思伝達に有効である。

スーパーコックピットでは、Fig. 4に示すように歩行移動時には操作者の視野の大部分を占める9面立体ディスプレイ、腕

Fig. 4 Super cockpit system

作業時には操作者の頭部にヘッドマウンテッド・ディスプレイ(HMD)を装着して視覚情報の提示を行っている。また、聴覚情報は立体音響装置により周辺音情報の提示を行っている。さらに、ロボットの腰部の運動を加速度や位置変化により操作者に体性感覚を提示することも行っている。これらの装置により、操作者はあたかもロボットの中に入っているような高い臨場感を得ることができた。しかしながら、高い臨場感を操作者に与えるには操作者の感覚器の受容範囲を提示装置で覆う必要があるため、装置が大掛かりになってしまった。

一方、開発した遠隔操縦システムでは、可搬性を重視し、特に装置規模が大きくなる体性感覚の提示は行わず、操作者は着座姿勢で操作することにした。視覚情報は、ロボットの頭部ステレオカメラの映像を立体視ディスプレイで提示した。立体視ディスプレイには、専用めがね不要のタイプを採用し、HMD等を装着する手間を省くとともに、操作者の視界を提示映像で占有することを避けた。また、聴覚情報はロボットに搭載されたステレオマイクで拾った音情報を、2chステレオスピーカで提示するに留めた。

3.2 操作者の手腕操作による操縦機能

対象物を扱う作業のように、実時間で自在に精度よくロボットの手先を操る必要がある作業では、人間の手腕動作をロボットの手腕動作として利用できるマスタスレーブ制御方式が適している。また、環境との接触を伴う作業では、接触力・トルクを操作者の手腕に感度よく直接伝達することが、作業を確実にを行うために有効である。さらに、手腕作業では力とトルクの方角・大きさによって対象の動かし方が異なるため、力とトルクの識別が精度よくできることも重要な要素である。

スーパーコックピットでは、操作者の腕の動作範囲と、ロボットアームの動作範囲がほぼ同等になるように設計した7自由度外骨格型マスタアームを手腕操作機器とし、操作者の手先位置姿勢がロボット手先の位置姿勢と一対一に対応するようなバイラテラル・マスタスレーブ制御方式を用いた。このシステムは高い臨場感の提示とともに、操作者がロボットの中に入り込んだような感覚で操縦することができ、高い自己投射性を実現した。しかし、マスタアームが大型化しただけでなく、操作者に対する力・トルク伝達感度が低下した。これは以下の理由による。スーパーコックピットのマスタアームは、外骨格型構造を採用したため、その動作範囲内に操作者自身と干渉する領域が

多いことから、マスタスレーブ制御則に制御安定性に優れた並列型制御方式 [16] を用いた。本方式は、操作者がマスタアームに加える力である操作力（マスタアーム把持部の力センサで計測）と、スレーブアームが環境に与える力（スレーブアーム手首部の力センサで計測）の力偏差を 0 にするようにマスタアームとスレーブアームの位置を制御する方式である。しかし、マスタアームの慣性や軸の摩擦が大きくなったため、マスタアームの位置の応答性が十分確保できず、スレーブアームとの間で力偏差が残ってしまった。その値は、操作速度に応じて大きくなり、実験では 1~6 [N] の範囲であった。

一方、開発した遠隔操縦システムでは、マスタアームを操作者の前面から対向する型に配置したため、操作者との干渉領域が少ないことから、応答性に優れた力逆送型制御方式を用いた。本方式は、スレーブアームが環境から受ける力をマスタアームで再現するように開ループでトルク制御するものである。開発したマスタアームは、小型で慣性も小さいことに加えて、各軸の摩擦を低減することにより、力の再現性を向上させ、スレーブアームの提示力との力偏差は 1 [N] 以下と、操作性が向上した。ロボットの手先位置姿勢は、マスタスレーブ制御方式で操作することにし、ロボットの冗長自由度の使い方は別途指令するようにした。また、操作者の椅子に、操作者の疲労軽減と手先動作の精度向上の面で有効である肘置きを設置した。

3.3 操作情報を提示／入力する機能

産業車両の運転では、乗り込みのための移動だけでなく、運転席への着座、手足による運転操作を行うため、全身動作や足機能の変更に対応できる遠隔操縦システムが必要である。このためには、様々な状況に適した遠隔操縦手法を組み合わせた操作手法が必要である。特に、人間の操作入力を支援する自律機能の付加や、状況に適した自律動作の選択が容易に行えることが重要だと考える。

遠隔操縦を円滑に進める手法として、“Shared Autonomy” [17] や “Supervisory Control” [18] などの概念が提案されている。しかし、現状では、状況に応じて自動的に適した操作手法を選択する手法は確立されていない。したがって、ロボットの制御情報・操作手法の状況を操作者が把握し、実現可能な操作手法を操作者が状況に応じて任意に切替えることが必要である。

スーパーコックピットでは、遠隔操作対象とする人間型ロボット HRP-1 が、その下半身に関しては歩行のみしか指令できない仕様であったため、上半身の遠隔操作手法は、操作者のハンド、腕、頭の動きをロボットの各部の動作に対応させるマスタスレーブ制御方式、下半身の遠隔操作手法は、音声認識やマウスを使って歩行指令を出す移動コマンド方式に固定されていた。

開発システムでは、スイッチ操作により各種操作手法を切り替えられるようにし、GUI にロボットの全身姿勢状態、操作手法の選択状態、操作手法に合わせたセンサ情報を提示するようにした。選択できる操作手法については 4 章で詳細を述べる。

3.4 手腕操作と同時に他の部位を操作する操縦機能

人間型ロボットの遠隔操縦では、手腕操作での指示動作と同時に、手腕操作ほどの精度は望めなくても他の部位の動作を直接指示したい場合がある。この場合、操作者による手腕以外の動作部位を用いた操作方法が必要であり、操作者の手腕動作を

妨げない入力装置が望ましい。

スーパーコックピットでは、上半身の動作は操作者の動きに連動した操作方式であったため、手腕と頭部の同時操作は容易であったが、下半身の動作は歩行のみを考慮したので、足の操作は考慮されなかった。また、ロボットの姿勢を維持するには、操作者自身の姿勢も維持しておく必要があったため、長時間の作業には操作者の負担が大きい問題があった。

開発システムでは、腕操作以外の頭部搭載カメラのパン・チルトやハンドの開閉はマスタアームの手元スイッチで操作するようにした。また、着座して運転する人間型ロボットには、手腕動作だけでなく足動作が必要であることから、直感的な操作方法として、足で操作ができる「マスタフット」を開発した。操作者は着座状態で操作するので、手腕操作と同時に使えるマスタフットは、ロボットの足動作指示に有効である。また、頭部搭載カメラのパン・チルト操作もマスタフットを用いて、手腕操作と同時にできるようにし、操作性の向上を図った。

4. 遠隔操作手法

人間型ロボットの全身動作遠隔操作法として、操作者の負担が軽減されるように、ロボットの作業内容に応じて以下の二つの操作方式を切り替えるようにした。

- (1) 管理制御方式：産業車両への乗り込み時の歩行動作や着座動作のように一連の全身動作を指令する場合や、ロボットの視覚提示画面で操作者が指示した任意の位置に手先を自動的に移動させる場合（視覚補助機能）に用いる。本制御方式では、操作者の指令に基づき事前あるいは実時間で生成されたロボットの全身動作パターンを、操作者の判断で再生開始あるいは止められる。
- (2) マスタスレーブ制御方式：産業車両への着座後の両腕両足の操作や頭部カメラの操作など、操作者がマスタアームやマスタフットの操作により直接操作する場合に用いる。本制御方式では、入力装置を通じた操作者の指令により実時間でロボットへの指令を生成し、ロボットを制御する。また、手先・足の操作はそれぞれマスタアームとマスタフットで行うが、マスタアーム把持部のトリガスイッチを押し続ける間、マスタ側の変位をスレーブ側に伝達する形とした。以下では、上記の操作手法を産業車両の運転作業を行うロボットに適用した例を示す。

4.1 着座動作（管理制御方式とマスタスレーブ制御方式の切替）

人は椅子に座るとき、バランスを取りながら臀部を下げるのではなく、座る直前にバランスを崩して臀部を椅子の座面に乗せる。そのとき、臀部は衝撃を和らげるクッションの役割を果たす。しかし、遠隔操縦の対象とした人間型ロボット HRP-1S には人の臀部に相当する部分がなく、衝撃を和らげる効果は期待できない。そこで、椅子の座面に臀部を乗せる動作はバランス状態で行い、その後足足の位置を変えて安定な着座状態とする 2 段階の動作を行わせることとした。この方式は高齢者の着座方法に近い。

まず、第 1 段階では、HRP-1S 全体の重心位置を調整してバランスを保ちながら着座位置に臀部を接近させて椅子に座る。こ

Fig. 5 Two way methods for seating

のような方法で椅子に座ろうとすると、Fig. 5に示すように上体を直立させたままでは、臀部はほぼ真下に降りる。着座した後の安定性を考えると臀部の位置に対し両足ができるだけ前にあるのが望ましい。そこで、上体を前屈みにし、その分臀部を後ろに下げてバランスを取って着座し、着座後に上体を直立に戻す方法を採用した。

全身動作軌道は、静的バランスを取った二次元面内でのパターンを作成後、シミュレータで動的バランスを確認して作成した。着席の動作パターンは、臀部と椅子の接触位置と着座開始姿勢により生成できるので、異なる着座位置に対してもパラメータを変更することで、即座に対応することが可能である。作業時には管理制御方式により着席動作パターンを再生することとした。

第1段階の着席状態では、両足の着地点と臀部の着地点で作る支持多角形が小さく、運転作業時の傾きや振動に対する安定性に心配があった。そこで、第2段階として、両足を前に移動させ、ロボットの支持多角形を大きくすることを検討した。

足位置を動かすには、足を地面に着いたまま動かすすり足と足を地面から上げて動かす方法がある。HRP-1Sの足裏はゴム製で摩擦係数が大きく、すり足では動かない。また、着座後に片足を上げると、足裏が離れる前にHRP-1Sが傾く。これは臀部が小さく片足を上げると、他方の足の着地点と臀部で構成する支持多角形が小さくなり、ロボット重心の床面への投影点が支持多角形の外になるためと考えられる。そこで、足を上げる側の手を座席付近の適当な位置に着いて、負荷を支持することを検討した。

手で体を支えるには、手の負荷限界と、肩関節で発生できるトルクの限界という二つの制約がある。手の負荷限界を力センサの保護の観点から力センサの定格値である100[N]とし、着手に適した位置を計算した。その結果、Fig. 6のように右足を移動する場合での右手の着手位置を決定した。図のXY平面は床面を表しており、各表示点は床面への投影点である。直線Aは、ロボットが右足を上げた場合に、ロボット座標原点付近を重心位置とした重力によって、ロボット臀部接触点の中心と仮定した臀部着地点と、左足の足裏中心と仮定した左足着地点を結んだ直線周りに生ずる転倒モーメントを、右手の負荷限界である100[N]の負荷で受けることができる右手の着手位置の集合である。右腕の肩関節に発生トルクの制約がなければ、この直線Aより下部に右手を着くことで100[N]以下の負荷でロボットは支えられる。一方、曲線Bは右手に100[N]の負荷がかかった場合

Fig. 6 Hand position for moving foot position

に、静的な釣り合い状態で、右腕の肩関節の発生トルクが最大となる右手の着手位置の集合である。したがって、ロボットの右手で100[N]の負荷を受けるためには、曲線Bより上部に右手の着手位置を選ぶ必要がある。よって、直線Aと曲線Bで囲む範囲内が右手の着手位置として適した領域になる。HRP-1Sの手腕動作範囲内で着手できる位置を実機で検討した。Fig. 6に着手可能領域と実際に着手した位置を示す。

4.2 アーム干渉回避動作（管理制御方式とマスタスレーブ方式の融合）

HRP-1Sのアームは7自由度あるので、腕姿勢を指示するには手先の位置姿勢のほかの一つの冗長自由度の設定が必要となった。そこで、冗長度の指標として「肘角度」[20]を用いて肘位置を設定した。肘角度とは、肩関節中心と手首関節中心を結ぶ直線Lに対してロボットの固定座標系での鉛直下方に肘関節が存在する場合を肘角度0とし、肘関節の位置が直線Lを中心軸として回転した角度 θ の方向に存在するとき肘角度 θ とする角度である。

HRP-1Sのアームの遠隔操縦では、マスタスレーブ制御方式で与えられる手先位置姿勢指令と、操縦者が同時に設定する肘角度指令から各軸位置指令を計算する。このとき、肘角度指令の増減はマスタアームのスイッチ操作で行い、手先位置姿勢指令は、マスタアーム把持部のトリガスイッチを操作者が押し始めた時点のマスタアームの位置姿勢からのマスタアームの位置姿勢変位をHRP-1Sへの手先位置姿勢変位指令値とし、トリガスイッチを押し続ける間、トリガスイッチが押された時点のHRP-1Sの手先位置姿勢にその指令値を加えることで、HRP-1Sの手先位置姿勢指令とする。肘角度により、肘の上下操作をイメージして、操作者は手先の位置姿勢を保持したまま、肘位置の変更ができる。

HRP-1Sのアーム動作範囲には、上腕部と胴体部が干渉する領域がある。この干渉領域はHRP-1Sの視覚カメラで直接操作者が認識できないので、HRP-1Sの自律動作として、肘角度を自動更新して干渉回避する機能を管理制御方式で付加した。この機能では、Fig. 7に示すように、肘角度指令と手先位置・姿勢指令から各関節角度指令を計算し、指令された肘関節の位置がHRP-1Sの上腕部と胴体部が干渉する領域の近傍にあるとき、肘角度指令を自動更新して肘関節の位置を干渉しない位置に移動させる。また、干渉しない領域では肘角度で指定された肘関

Fig. 7 Redundant control for the arm operation

Fig. 8 View of image processing

節の位置に戻す。これらの切り替えは各関節角度指令が急変しないように行った。

4.3 視覚補助動作（管理制御方式）

人が物をつかむ場合を考えると、目で見えた場所に手を無意識に動かすことができ、決して各関節の動きを意識するわけではない。それと同様に、遠隔操作においてもロボットの視野画面上で指定した場所にロボット手先を誘導する機能が操作者の負担軽減に有効と考えた。この場合、画面上で指定した位置をステレオカメラの画像処理で距離を計測し、ロボットの各軸角度から相対目標位置を計算する [19]。

また、ロボットが産業車両に乗り込む場合、操縦席の各種設置物との干渉を回避してロボットが移動可能な経路が限定されているだけでなく、着席動作に必要な立ち位置の精度が歩行の精度だけでは確保できない。そこで、産業車両の床面に設置したターゲットを視覚認識処理し、ロボットの現在位置を計測して、目標歩行位置までの移動指令値を生成するようにした。操作者は Fig. 8 に示す計測結果を見て、正しいターゲットを認識しているかを判定し、歩行動作の指示をする。視覚処理の補助により、操作者は精度よく歩行指令を行うことができる。

5. 実 証 実 験

開発した遠隔操縦システムを用いて操縦する人間型ロボット

Fig. 9 Industrial vehicles

Fig. 10 Seating motion

Fig. 11 The right hand putting on a device and the foot moving forward

HRP-1S が産業車両を運転する実証実験を行った。使用した産業車両は、産業車両の代表的な運転姿勢を要する立ち姿勢運転型フォークリフト（ニチユ、FBR9-60、Fig. 9 左）、着座運転型バックホウ（日立建機、EX25、Fig. 9 右）を用いた。また、HRP-1S の機構的な制約のため、各車両に小規模な改造を施した。フォークリフトでは、操作レバーの長さ・角度変更、ハンドル操作力・走行速度の低減、搭乗台の面積拡張を行った。また、バックホウでは、操作レバーの長さ・角度変更、座席をロボット専用座席に置換、着用手用具と乗込用ターゲットマークの設置、キャノピー・フロアマットの撤去を行った。

5.1 着座実験

HRP-1S の着座動作をバックホウ実機で検証した。HRP-1S の臀部は着座用に設計されていないので、バックホウ座席に着座用シートを設置している。Fig. 10 に示すように、バランスを崩すことなく着席できた。操作者は管理制御方式で着席動作の実行を指示した。動作は GUI で監視した。

次に、Fig. 11 に示すように右手を着いて、右足を持ち上げ前方に移動させた。右足を前方に移動させた場合、右足と臀部で構成するロボットの支持多角形が大きくなり、ロボット重心の床面投影点が支持多角形内に入るため、左手の支持なしに左足を移動させることができた。Fig. 12 に右足が移動したときのデータを示す。右足が持ち上がったときに、左足と右手に荷重がかかり、右足が着地したときに右手の荷重がなくなる。

操作者は、右手の着用手用具付近への移動を管理制御方式、着行動作と足の移動をマスタスレーブ制御方式で行った。足の動作は、おおまかな位置移動をマスタフット、微妙な位置移動

Fig. 12 The trajectory of right foot position and trend data of feet force and right hand force

による足にかかる荷重の調整をスイッチ操作で指示した。着席状態は、座席の傾きや着席開始位置のずれから毎回異なるが、足の動作をマスタスレーブ制御方式で行うため、毎回荷重を適切に調整して安定して着座することができた。マスタフットによるマスタスレーブ制御方式では、マスタアーム把持部のトリガスイッチを操作者が押し始めた時点のマスタフットの位置からのマスタフットの位置変位をロボット側への足位置変位指令値とし、トリガスイッチを押し続ける間、トリガスイッチが押された時点のロボットの足位置にその指令値を加えることでロボット側への足位置指令とする。また、運転作業終了後、座席から立ち上がる起立動作も、着座時の逆手順で足位置を移動させ、着席完了姿勢に戻して、着座動作の逆軌道を再生する管理制御方式で立ち上がることができた。

5.2 アーム作業実験

産業車両の運転は、一般にレバーやハンドルを操作して行う。使用したフォークリフトでは、レバーはロボット正面に位置したため、視野に入りやすく操作が容易であった。一方、ハンドル操作は、ハンドルの接線方向に力をかけて回転させるために、手先姿勢や操作力の調整が必要で操作の難易度が高かった。Fig. 13にハンドル操作時の左手先位置と手先がハンドルに加えた力ベクトルを示す。力ベクトルから接線方向以外の力を調整しながらハンドルを回していることが分かる。力提示なしではハンドルに大きな力加わり安定に操作できなかった。

バックホウの運転はレバー操作のみであるが、前方に位置する走行レバーに比べて、バケット位置を操作するレバーの操作の難易度が高い。なぜなら、HRP-1Sの動作範囲下方に位置するため、アーム動作範囲限界やHRP-1S本体とアームの干渉を考慮して操作する必要があるからである。Fig. 14に走行レバー

Fig. 13 The trajectory and force vector of left hand at the handle operation of the lift truck

Fig. 14 The trajectory and force vector of the left hand at lever operation of the backhoe

Fig. 15 The motion of riding on the backhoe

操作時の左手先位置と加わった力ベクトルを示す。レバーを前方に移動させると、レバーの操作反力が加わる。操作者は、レバー反力を感じながら、レバーの動作方向を認識し、HRP-1Sの手先位置を調整している。

5.3 乗り込み実験

バックホウ座席への乗り込みを管理制御方式で行った。移動経路を視覚で計測するために、床面にターゲットマークを4箇所設置し、目標移動位置との相対関係を設定した。視覚計測の位置精度は約 ± 1 [mm]、歩行移動を含めて平均10 [mm]で位置決めすることができた。Fig. 15に乗り込み動作の様子を示す。

操作者は、移動位置によって計測するターゲット、歩行方法の組を選択し、計測結果を判断して歩行動作を指示している。本手法を用いることにより、異なる車両の乗り込み動作についても、ターゲットマークの配置と歩行方法を変更することで対応が可能になる。また、視覚処理の補助により、操作者は位置決め精度の必要な動作に対して操作負担少なく指示することができた。視覚計測ができない場合は、移動位置を直接指示する操作方法を用いる。

5.4 総合作業実験

フォークリフトとバックホウ、二つの産業車両に対して、一連の作業を行う遠隔操作実験を、開発した遠隔操縦システムを用いて行い、人間型ロボットが異なる産業車両の運転作業を行えることを確認した。

フォークリフトの運転作業は、人が運転する場合の3倍以内という目標時間を設定して、所定の作業を2人の操作者で行った。内容は前進、荷物の持ち上げ、後進、方向転換、所定場所への荷物の設置、後退である。本実験は2002年3月のROBODEX 2002の会期中12回実施したデモにおいて公開した。Fig. 16にデモの様子を示す。

バックホウの運転作業は、屋外環境に設置したバックホウで操縦席への乗り込み、着座、運転作業までを行った。走行・掘削作業を行う様子をFig. 17に示す。本実験は、HRP-1Sを遠隔操縦して行い、人が直接運転して一連の作業を行う時間の約3倍以内で行うことができた。人の3倍という作業時間は十分に満足できるものではないが、応用の初期段階でもあり、人間型ロボットで産業車両を運転させることに対する今後の可能性を示せた。

作業時間の違いは、運転操作開始までの乗り込み・着座動作では、ロボットの移動能力・全身動作において人間並みの動作を実現できていないことが問題である。運転操作では、レバーの操作速度がロボットの遠隔操縦では人間の直接操作に比べて遅いことが問題である。これは、人間が直接運転操作するときには、指先や手のひらを巧みに使い、レバーの操作力を微妙に調整しているが、ロボットのハンド部は1自由度のグリップ機構なので、腕全体の動作で操作力を調整するからである。

また、長時間、レバー操作を行うと、レバーの把持位置がずれて操作性を損なうことがあった。これは、ロボットのハンド部には、すべりを検出するセンサがなく、レバーに平行な位置のずれは手先反力・モーメントだけでは操作者が認識しにくいことが原因である。

今回の実験では、産業車両運転の中の定型作業に管理制御方式を採用し、各作業段階で必要な操作手法をスイッチで簡単に

Fig. 16 Demonstration in ROBODEX 2002

Fig. 17 The tele-operated HRP-1S driving the backhoe in the open-air

選択できるようにすることで、操作者の操作負担を軽減し、遠隔操作を効率化することができた。

6. ま と め

本論文では、人間型ロボットの汎用的な遠隔操縦装置の開発を目指して、産業車両を運転する人間型ロボットの遠隔操縦へ適用し、開発した遠隔操縦装置の構成と、運転作業を円滑に行うための遠隔操作手法について述べた。開発した遠隔操縦装置は、分解して現場に運べる可搬型であり、人間型ロボットを操縦する基本的な機能を備えている。また、産業車両の遠隔操縦実験により、以下の結論を得た。

- (1) 開発した操作手法により、全身同時動作を実現し、操作者の負担軽減し、遠隔操作を効率的に行うことができた。
- (2) フォークリフトとバックホウの2種類の産業車両について、人間型ロボットを遠隔操作して人間の代わりに運転することができた。

今後、実作業に適用していくためには、操作者の負担軽減が重要である。特に定型作業の負荷を軽減し、操作者の判断が求められる非定常作業に集中できることが必要である。そのためには、操作者が指示しなければならない部分のみ遠隔操作とし、残りはロボットの自律に任せる自律・遠隔融合が必要と考えており、今後は、その方向に研究を進めていく。ただし、その場合も、運転作業に特化して開発するのではなく、運転作業にも使用可能な汎用的な遠隔操作手法を開発することが目標である。

人間型ロボットは運転以外の能力を持つので、車両を降りて周囲の状況を確認したり、故障時に点検を行ったりする作業も期待される。汎用の遠隔操作を目指した開発は、このような運転以外の作業にも適用可能であり、人間型ロボットの能力を最大限に引き出す遠隔操作手法として期待される。

謝 辞 本稿の研究は、経済産業省「人間協調・共存型ロボットシステム研究開発プロジェクト」の一環として実施された。経済産業省、新エネルギー・産業技術総合開発機構、(財)製造科学技術センター、(独)産業技術総合研究所、東急建設(株)、京都大学吉川・横小路研究室をはじめ、ご協力いただきました多くの方々に感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] J. Yamaguchi, E. Soga, S. Inoue and A. Takanishi: "Development of a Bipedal Humanoid Robot—Control Method of Whole Body Cooperative Dynamic Biped Walking," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.368–374, 1999.
- [2] K. Nishiwaki, T. Sugihara, S. Kagami, F. Kanehiro, M. Inaba and H. Inoue: "Design and Development of Research Platform for Perception-Action Integration in Humanoid Robot: H6," Proc. Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1559–1564, 2000.
- [3] M. Gieneger, K. Löffler and F. Pfeiffer: "Towards the Design of Biped Jogging Robot," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.4140–4145, 2001.
- [4] T. Furuta, Y. Okomura and K. Tomiyama: "Design and Construction of a Series of Compact Humanoid Robots and Development of Biped Walk Control Strategies," CD-ROM Proc. IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots, p.84(pdf), 2000.
- [5] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka: "The Development of Honda Humanoid Robot," Proc. IEEE Int. Conf.

- on Robotics and Automation, pp.1321-1326, 1998.
- [6] M. Hirose, Y. Haikawa, T. Takenaka and K. Hirai: "Development of Humanoid Robot ASIMO," Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Workshop2 (Oct. 29), 2001.
- [7] H. Inoue, S. Tachi, Y. Nakamura, K. Hirai, N. Ohyu, S. Hirai, K. Tanie, K. Yokoi and H. Hirukawa: "Overview of Humanoid Robotics of METI," Proc. the 32nd Int. Symposium on Robotics, pp.1478-1482, 2001.
- [8] 横井, 中嶋, 小林, 連沼, 御船, 柳原, 上野, 遠藤, 後久: "人間型ロボットによる着座型産業車両の代行運転", 第8回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.264-269, 2003.
- [9] 高瀬: "テレオペレーションの過去と未来", 日本ロボット学会誌, vol.21, no.3, pp.225-228, 2003.
- [10] 中嶋, 上西, 伊藤, 五百井: "等慣性マスタアームとマスタスレーブシステムの開発", 川崎重工技報, no.101, pp.15-22, 1988.
- [11] 大築, 真鍋, 石見, 中嶋, 水野, 猪熊: "水中マニピュレーションシステムの開発", 川崎重工技報, no.110, pp.25-33, 1991.
- [12] 大築, 片岡, 桂川, 中嶋: "パラレルマニピュレータの力制御", 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.873-874, 1993.
- [13] H. Hasunuma, H. Kagaya, M. Koyama, J. Fujimori, H. Mihune, H. Moriyama, M. Kobayashi, T. Itoko and S. Tachi: "Tele-operation Master-arm with Gripping Operation Devices," Proc. 9th Int. Conf. Machine Automation, pp.567-572, 2000.
- [14] H. Hasunuma, M. Kobayashi, H. Moriyama, T. Itoko, Y. Yanagihara, T. Ueno, K. Ohya and K. Yokoi: "A Tele-operated Humanoid Robot Drives a Lift Truck," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.2246-2252, 2002.
- [15] 中嶋, 家中, 藤森, 加賀谷, 森山, 連沼, 久保田, 志子田: "可搬型遠隔制御装置の開発 (HRP 代行運転分野)", 日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会予稿集, 2D16, 2002.
- [16] 宮崎, 荻原: "バイラテラル・マスタ・スレーブ・マニピュレータの並列型制御方式", 日本ロボット学会誌, vol.7, no.5, pp.446-452, 1989.
- [17] W. R. Ferrell and T. B. Sheridan: "Supervisory control of remote manipulation," IEEE Spectrum, pp.81-88, 1967.
- [18] 平井: "Shared Autonomy の理論", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.6, pp.788-793, 1993.
- [19] 連沼, 中嶋, 小林, 御船, 宮原, Sian, 横井: "人間型ロボットの遠隔操作手法の開発 (HRP 代行運転分野)", 日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会予稿集, 2D17, 2002.
- [20] 小林, 樹野, 松山, 小久保: "人間型双腕マニピュレータの順運動学と逆運動学", 法政大学計算センター研究報告, 9, pp.43-50, 1996.

連沼仁志 (Hitoshi Hasunuma)

1968年1月1日生。1993年京都大学大学院修士課程工学研究科応用システム科学専攻修了。同年川崎重工工業株式会社に入社。マイクロマシン, 遠隔操作ロボットシステムの研究開発に従事。現在, システム技術開発センター第二開発部先進メカトログループ主事。

(日本ロボット学会正会員)

小林政巳 (Masami Kobayashi)

1965年2月5日生。1990年明治大学大学院工学研究科修士課程修了。同年川崎重工工業株式会社に入社。2003年4月より新エネルギー・産業技術総合開発機構に転出。工学博士。人工知能の産業応用, オフライン教示システム, 遠隔操作ロボットシステムの研究開発に従事。2001年日本ロボット学会実用化技術賞受賞。日本機械学会, 人工知能学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)

宮原啓造 (Keizo Miyahara)

1964年11月13日生。1991年神戸大学大学院自然科学研究科修士課程修了。同年川崎重工工業株式会社に入社。各種メカトロニクスシステムの研究に従事。1997年 Johns Hopkins 大学機械工学科修士課程入学。1999年同修了。移動メカニズム, 工学系逆問題に興味を持つ。システム技術開発センター第二開発部先進メカトログループ主事。IEEE, 農業機械学会の会員。Ph.D.

(日本ロボット学会正会員)

森山 尚 (Hisashi Moriyama)

1972年8月29日生。1998年筑波大学大学院博士課程工学研究科知能機能工学専攻中退 (工学修士)。同年川崎重工工業株式会社に入社。機構シミュレーション・制御装置のシステム設計に従事。現在システム技術開発センター第二開発部先進メカトログループ。計測自動制御学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)

中嶋勝己 (Katsumi Nakashima)

1956年9月28日生。1981年京都大学大学院修士課程工学研究科精密工学専攻修了。同年川崎重工工業株式会社に入社。ロボット, 自動化装置のシステム開発, 機構開発に従事。現在, システム技術開発センター第二開発部先進メカトログループ参与。

(日本ロボット学会正会員)

御船文里 (Humisato Mihune)

1964年9月7日生。1990年大阪大学大学院博士課程前期基礎工学研究科物理系機械工学分野専攻修了。同年川崎重工工業株式会社に入社。ロボット, 自動化装置のシステム開発に従事。現在, システム技術開発センター第二開発部先進メカトログループ主事。

(日本ロボット学会正会員)

鷹取正夫 (Masao Takatori)

1966年9月15日生。1989年青山学院大学理工学部機械工学科卒業。同年川崎重工工業株式会社に入社。メカトロニクス製品の開発に従事。現在システム技術開発センター第二開発部先進メカトログループ主事。日本機械学会の会員。

家中良太 (Ryota Ienaka)

1974年7月11日生。1999年筑波大学大学院博士課程工学研究科知能機能工学専攻中退 (工学修士)。同年川崎重工工業株式会社に入社。メカトロニクス製品の機構設計に従事。現在システム技術開発センター第二開発部先進メカトログループ。

横井一仁 (Kazuhito Yokoi)

1961年11月11日生。1986年東京工業大学大学院機械物理学専攻修了。博士 (工学)。1986年工業技術院機械技術研究所に入所。1995~1996年スタンフォード大学客員研究員。2001年産業技術総合研究所知能システム研究部門主任研究員。神奈川工科大学連携大学院助教授。東京工業大学非常勤講師兼任。人間協調・共存型ロボットシステムプロジェクトに従事。IEEE, 日本機械学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)