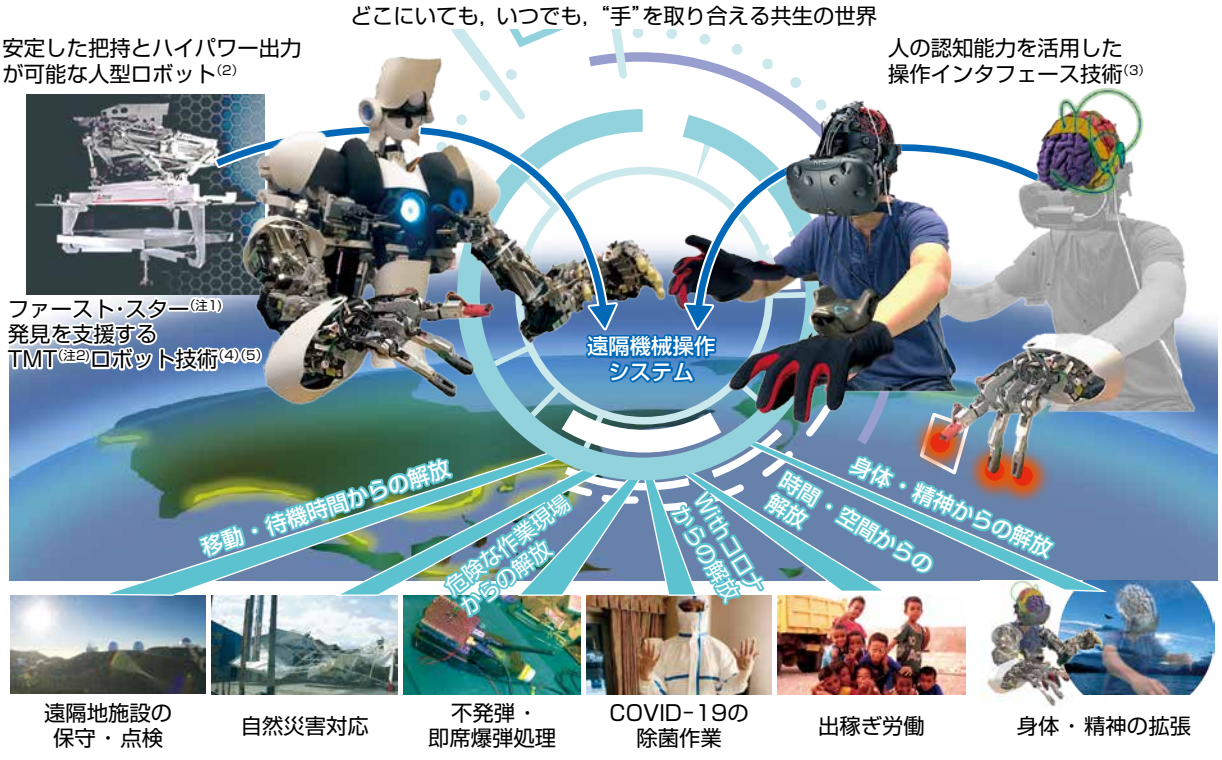
# 人×機械の遠隔機械操作システム

*Remote Machine System with Sense of Oneness*

春名正樹* *Masaki Haruna*
畑　浩一* *Koichi Hata*
川口　昇† *Noboru Kawaguchi*
荻野正樹‡ *Masaki Ogino*
小池俊昭§ *Toshiaki Koike*

**要　旨**

遠隔にある観測施設の保守点検，頻発する自然災害対応，不発弾・即席爆弾処理，新型コロナウイルス(COVID-19)除菌作業等の身体的・精神的な負担の高い作業に対して，遠隔機械操作システム技術は人の安全と安心を実現する。大型望遠鏡事業で培った機構設計・駆動制御技術を適用した人型遠隔操作ロボットは，安定した把持を可能にするセルフロック機能を搭載した多指ハンドと，ハイパワー出力を可能にする直動リンク機構を持っている。オペレータの操作負荷を最小限にするシンプルかつ直感的な操作インタフェースは，遠隔機械の力触覚情報を視覚的にフィードバックする新たに開発した視覚的力触覚技術を適用している。視覚的力触覚フィードバックが脳内情報流の45%低減効果，及び視覚以外のモーダル(音と振動)フィードバックに対する優位性を持つことを脳波信号から確認した。これらの技術を統合した小型遠隔操作ロボットは，6 kgの硬く重いアルミニウム部材から壊れやすい生卵やポテトチップスまでを，シンプルな操作インタフェースでありながら直感的に把持・運搬可能である。筆者らは“Small World Project”(1)としてインドネシアの無電化・電力不安定地域に暮らす人々との交流活動を通して，慣れ親しんだ家族や友人，地域での生活が人間の幸福にとって不可欠であると実感し，生活と労働の両立の問題を考えてきた。仮想／拡張現実(VR／AR)技術とグローバルな通信技術の進展で，この遠隔機械操作システムが国内外での労働人口偏在のソリューションになることを目指し開発を推進している。




（注１）　宇宙創生時のビッグ・バン直後の初期の光　　（注２）　TMTは，TMT International Observatory LLCの登録商標である。

**人×機械の遠隔融合システムが実現する，“どこにいても，いつでも，“手”を取り合える共生の世界”(イメージ)**

TMT(Thirty Meter Telescope)ロボット(4)(5)開発で培った要素技術群を適用したハイパワーな人型遠隔操作ロボット，及び視覚的力触覚(2)(3)を搭載したシンプルかつ直感的な操作インタフェースの統合によって，人の身体的・精神的な負荷を解放し，さらに“拡張”への進化を目指す。遠隔機械操作システムは人の安心と安全，慣れ親しんだ地域で家族や友人との生活を維持できる遠隔労働を可能にする。“どこにいても，いつでも，“手”を取り合える共生の世界”実現を目指し開発を推進する。

*三菱電機㈱ 先端技術総合研究所　†同社 通信機製作所　‡関西大学(工博)
§Mitsubishi Electric Research Laboratories Inc.(工博)

## 1. ま え が き

日本を含む先進国では人口減少と少子高齢化による労働力不足が懸念されている。その解決策として自律ロボットの開発があり，人工知能技術のロボット適用が期待されている。特に，移動技術についてはGoogle社の自動運転，及びBoston Dynamics社やMIT（マサチューセッツ工科大学）の脚移動の進展は著しい（**図１**）。三菱電機の取組みでも人運転行動から人工知能技術によって自動運転行動が獲得可能であることを確認している[6]。

一方で，人の手を代替できる精巧な自律マニピュレーションの実現は数十年先であるとも言われている。近年，VR／AR技術及び通信技術の進化から，遠隔操作が注目を集めている。1940年代に放射線環境での作業を目的に研究が始まり，1980年代に電気・計算機技術の進展によってテレイグジスタンスやテレプレゼンスに昇華された。近年は手術支援ロボットが実用化されて活躍しているが，人作業代替を実現した遠隔機械操作システムはない。

## 2. ハイパワーな人型遠隔操作ロボット

三菱電機の大型望遠鏡事業[4][5]で重量物の高精度な駆動を実現するために培ったセルフロック機構をハンドに，直動リンク機構を上半身に採用した42自由度の人型遠隔操作ロボット技術検証機を構築した。片手で11自由度を持つ機械ハンドの各関節には，高減速ウォームギヤが実装され，対象物形状に沿って安定した把持が可能である。17自由度を持つ機械上半身（ハンド除く）の各関節には直動リンク機構が実装され，限られた体積と質量で高い推力を実現している。駆動範囲と駆動トルクを**図２**に示す[2]。

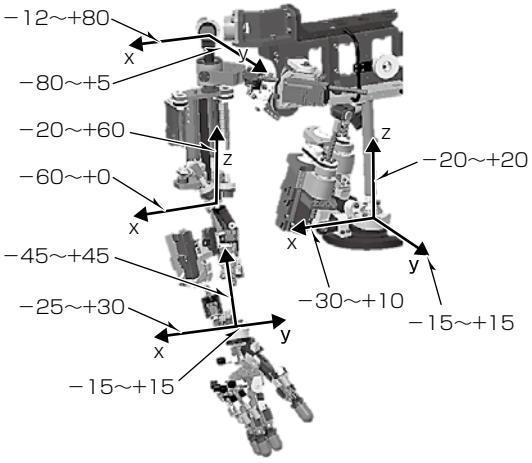
追跡調査時に撮影（2016年12月）

(a)　予想外の状況に即座に対応するGoogle社の自動運転車両

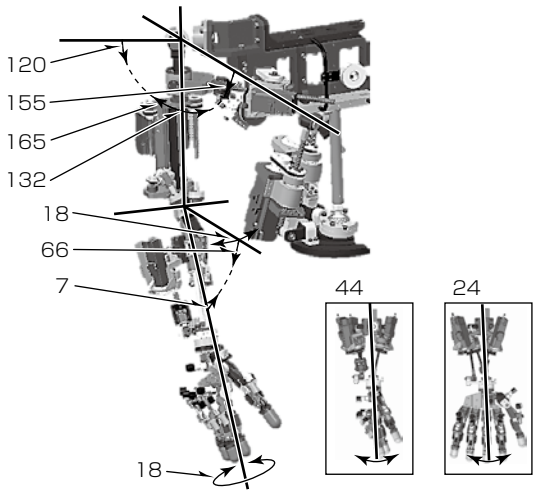
デモ参加時に会場で撮影（2015年5月）

(b)　Boston Dynamics社の４足歩行ロボット

**図１．自律化の進展が著しい移動技術**




(a)　駆動範囲（単位：°）




(b)　駆動トルク（単位：Nm）

**図２．人型遠隔操作ロボット試作機の設計[2]**

## 3. 直感的かつシンプルで繊細な作業ができる操作インタフェース

### 3.1　直感的な運動伝達インタフェース

手を使う作業をする際には，オペレータの手先位置と姿勢をロボットハンドへ正確に運動伝達することが重要である。この実現方式として順運動学方式と逆運動学方式の二つがある。順運動学方式として小型アームを利用した機械式操作インタフェース，逆運動学方式としてオペレータの手先空間６自由度計測できる光学計測式操作インタフェースを運動伝達検証用として試作した（**図３**）。機械式操作インタフェースはロボットと同じ構造の小型アームをオペレータが動かすことで直感的に全ての関節角度を生成できる。演算が不要であり，かつ，計測安定性が高い利点がある。一方で，操作インタフェースの自重がオペレータの負

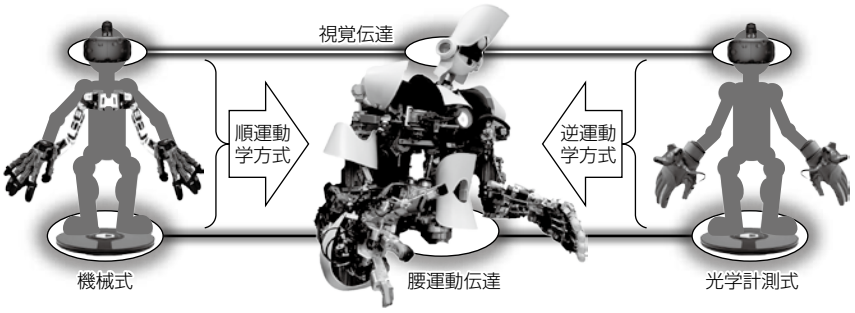



**図３．二つのオペレータの手先位置・姿勢の運動伝達インタフェース**

荷になる課題がある。光学計測式操作インタフェースは手先の空間計測だけでよくシンプルでオペレータの負荷が小さい利点がある。一方で，冗長自由度や関節駆動限界等について対策が必要である。アプリケーションによって運動伝達インタフェースの選択，組合せ，切替えをして最適な操作インタフェースを提供することが可能である。

### 3.2　シンプルで繊細な作業ができる視覚的力触覚伝達技術

#### 3.2.1　既存の力触覚伝達技術

遠隔機械の力触覚情報を物理的に伝達する方式として，設置型とグローブ型がある（**表１**）。特にHaptX社のグローブ型のHaptX Glovesは，各指先に30点の力フィードバックを搭載した最先端の市販品であって秀逸である。ただし，システムとしては圧縮機を含めて大型化する課題がある。また，人の力触覚は表層の皮膚感覚刺激だけではなく，深部感覚の重要性も指摘されている。

#### 3.2.2　視覚的力触覚技術の提案

人の力触覚認知には視覚が深く関与していることが知られている。Intuitive Surgical社の手術支援ロボットda Vinci(注4)では，物理的な力触覚情報がなくとも手術が可能であることが示唆されている。これら知見と筆者らの体験から，この開発では**図４**に示すように力触覚映像をロボットのカメラ映像にAR技術によって重畳することで，操作インタフェースの簡素化と操作性の向上の両立を目指した[3]。ロボット指先の接触点に視覚的力触覚情報を重畳する提案は筆者らの調査範囲で前例がない。また，この手法はARを利用するため遮蔽物のある作業に対してもロボット指先の接触状態をオペレータに視覚的に知らせることが可能である。

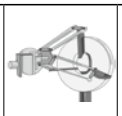
（注４）　da Vinciは，Intuitive Surgical Inc.の登録商標である。

#### 3.2.3　脳波計測による操作性評価

ハンド接触点に視覚的な力触覚情報を重畳する提案手法の操作性を，脳波（EEG）計測データにSCoT（Smooth Coherence Transform）ライブラリを使用して解析・評価した。SCoTは脳波センサによって取得された脳波データから定常ベクトル自己回帰モデルを構築して脳内信号の接続性の相関を推定する手法である。この解析では，32チャネルの電極を10-20法で規定される主要な頭皮の位置をカバーするように配置してデータ計測した後に，前頭部，後頭部，頭頂部，側頭，運動領域の五つの部位に射影し，さらに脳内信号の接続性の因果関係解析にffDTF（full frequency Directed Transfer Function）を用いて，これら五つの部位の脳内信号の流れの方向（興奮している時系列）を矢印で，流れの量を線の太さとして表す。本稿ではこの脳内信号の流れの方向と量を“脳内情報流（無単位）”という（**図５**）。

視覚効果の有無による操作性を**図６**に示すVR環境で評価した。１分間，次々と現れる“生卵”をゴールエリアに移

**表１．物理的な力触覚伝達インタフェース**

| |  | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 名称 | Sigma.7 | HGlove | Prime Haptic | HaptX Gloves | なし |
| メーカー／研究者 | Force Dimension | Haption | Manus VR | HaptX | TechExperts Inc. |
| 質量（kg） | データなし | 0.75 | データなし | 0.45(注3) | データなし |
| 型 | 設置型 | グローブ型 | グローブ型 | グローブ型 | グローブ型 |
| 手首への力フィードバック | ✓ | | | | |
| 指先への力フィードバック | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ |
| 指先への触覚フィードバック | | | ✓（５点） | ✓（120点） | |

（注３）　空気圧縮機を除く

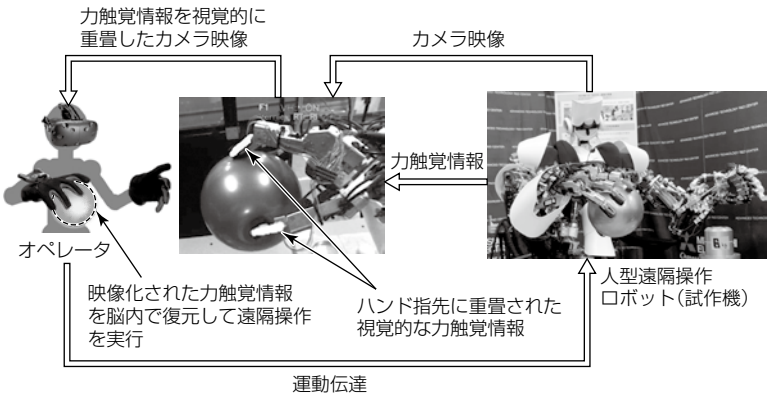



**図４．提案する視覚的な力触覚伝達技術**

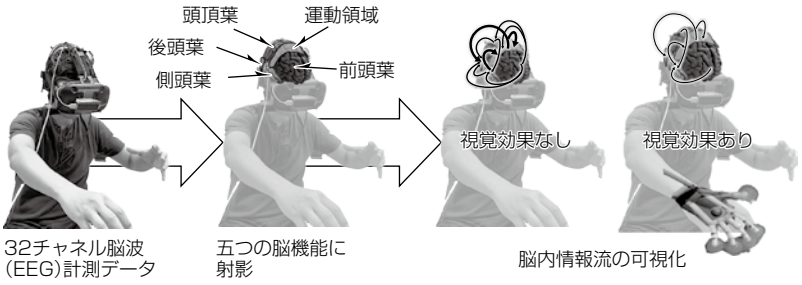



**図5．操作性の脳波データ解析プロセス[3]**

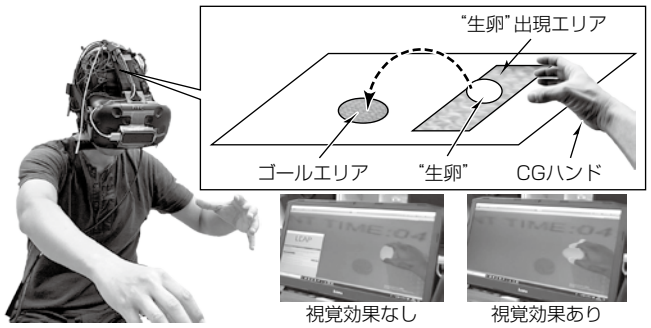
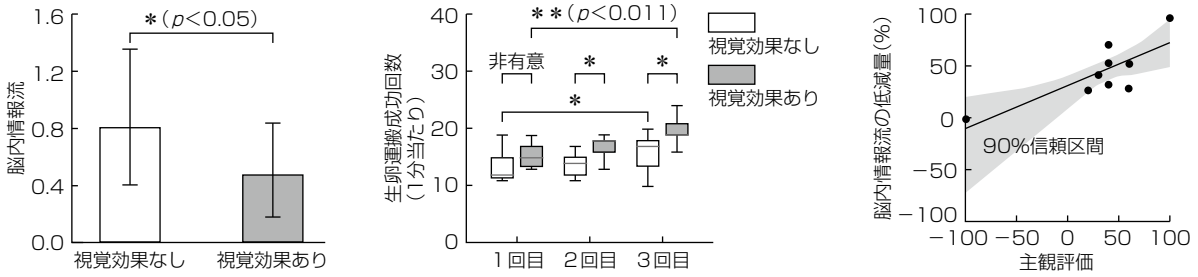



**図6．VR環境での操作性評価試験**

動させる作業である。結果として，脳内情報流として45%の低減，及び"慣れ"を促進する効果が確認された[3]（**図7**(a)(b)）。また，被験者の主観評価と脳内情報流の低減量には高い相関があり（ピアソン係数：0.795，$p$値：0.011<0.05），**図7**(c)），脳波が操作性評価の定量的指標として活用できることを確認できた。

さらに，人の応答性が高いとされる"音（スピーカー）"，物理的な力触覚フィードバックの一つである"振動（モータ）"，及び提案手法の視覚フィードバックとして"光"の三つのモーダルについて操作性の評価を実施した（**図8**）。結果として，把持力は"光"が最も小さく操作性が高いことが確認された（**図9**(a)）。また，主観評価として，遠隔作業空間に情報が集約されていることが操作性を向上させるという意見が多く"光"が最も高い評価であった（**図9**(b)）。脳内情報流としては"振動"と"光"が同等であった（**図9**(c)）。




(a) 脳内情報流の比較　(b) ゲーム成功回数の比較　(c) 被験者の主観評価と脳内情報流の低減量の比較

**図7．提案する視覚的力触覚技術の有無による評価結果[3]**

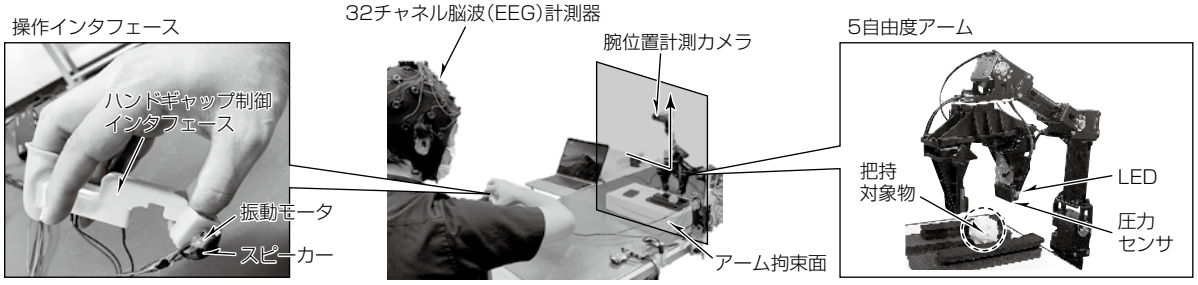
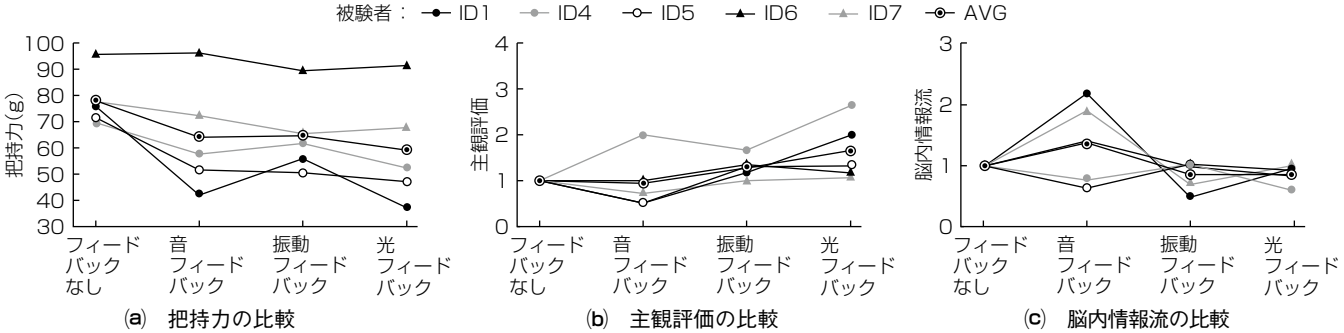



**図8．"音""振動""光"のモーダルフィードバックの比較評価試験**




(a) 把持力の比較　(b) 主観評価の比較　(c) 脳内情報流の比較

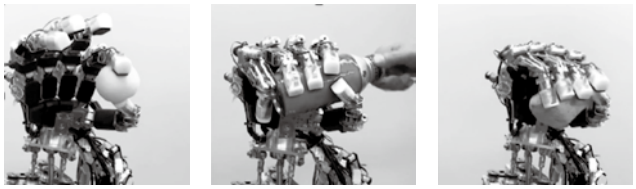
**図9．"音""振動""光"のモーダルフィードバックの比較評価結果**

これらの評価結果から，感覚フィードバックとしてハンド接触点に視覚的な力触覚情報を重畳する提案手法は，操作インタフェースを最小限にしながらもオペレータの認知負荷を低減するとともに，直感的で繊細な作業に効果があることを確認できた。

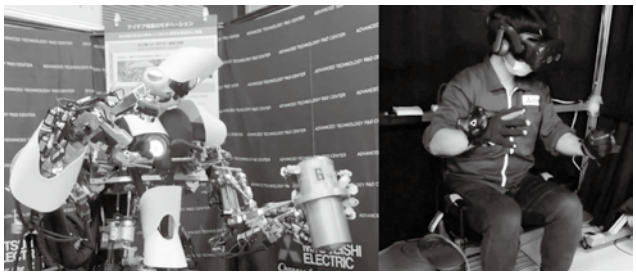
## 4. 人型遠隔操作ロボットシステム試作機での作業検証

セルフロック機構を搭載したハンドはボール，アルミニウム容器，石等を安定して把持できた(**図10**(a))。また，ハンドを除く各関節軸に直動リンク機構を採用したことで限られた体積でハイパワーな出力が得られ，片腕で6kg以上の対象物把持・運搬ができた(**図10**(b))。さらに，直感的な運動伝達インタフェースを介して人が操作することで初めてのタスクでも柔軟に実施することが可能であった(**図10**(c))。

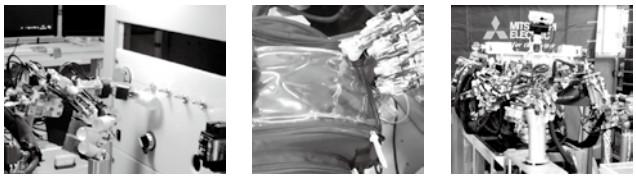
生卵，ポテトチップス，名刺の三つの繊細な把持・運搬作業，及びアルコール容器把持について提案した視覚的力触覚技術の検証を実施した(**図11**)。どの作業も把持力に応じて視覚的な力触覚情報が変化するハンド指先の色の変化を見ることで適切な力で把持と運搬が可能であること，遮蔽物のある作業に対してもロボット指先の接触状態を視覚的に提示可能であることを確認できた。



(a) セルフロック機構搭載ハンドの安定した把持



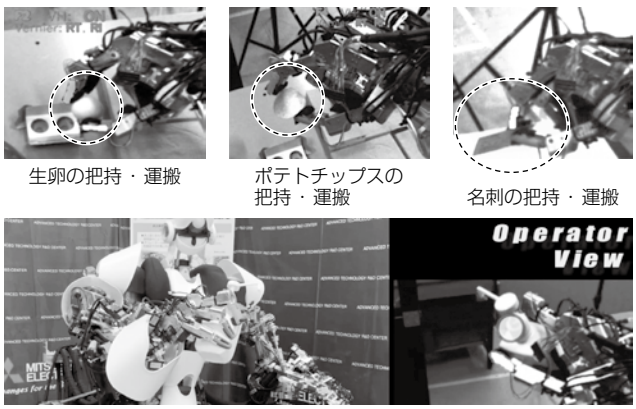
(b) 片腕6kg以上の把持・運搬が可能なハイパワーな人型遠隔操作ロボット



トグルスイッチ操作　ファスナー操作　円筒挿入操作

(c) 遠隔操作による様々なタスクへの柔軟な対応

**図10. 直感的な運動伝達インタフェースによる作業検証**




生卵の把持・運搬　ポテトチップスの把持・運搬　名刺の把持・運搬

アルコール容器把持で遮蔽が発生時にもARで力触覚情報を提示

**図11. 視覚的力触覚技術を適用した繊細な作業検証**

## 5. むすび

本稿では，大型望遠鏡事業で培った技術を適用したハイパワーな人型遠隔操作ロボット，これを直感的に操作する運動伝達インタフェース，及びシンプルで繊細な作業を可能にする視覚的力触覚伝達技術の提案と脳波計測による有効性実証結果について述べた。これら要素技術を統合したシステムは6kg以上の対象物から繊細な把持力調整が必要なポテトチップスまでの把持・運搬が可能であることを実証した。今後，開発した技術をコアに，身体的・精神的な負担の高い作業に対して人の安心と安全，さらに，Small World Projectの活動(1)で考えた人間の幸福を実現できる生活と労働の両立を可能にする遠隔機械操作システムの社会実装を目指す。

今回の技術開発に当たって，ハードウェア及びソフトウェアの製造には三菱電機エンジニアリング㈱と三菱電機マイコン機器ソフトウエア㈱が参画し実現した。

### 参考文献

(1) 三菱電機㈱：三菱電機グループとSDGs　Small World Project BOP層の暮らしに向けた研究開発の取組（2018）
http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/csr/management/sdgs/pdf/small_world_project.pdf
(2) 春名正樹，ほか：人×機械の遠隔融合システムの開発―視覚的力触覚を利用した操作提案と基礎検証―，情報処理学会インタラクション2020，448～453（2020）
(3) Haruna，M.，et al.：Proposal and Evaluation of Visual Haptics for Manipulation of Remote Machine System，Front. Robot. AI，DOI：10.3389/frobt.2020.529040（2020）
(4) 三菱電機㈱：注目の研究・技術／次世代超大型望遠鏡TMT「分割鏡交換ロボット技術」（2016）
http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/randd/spotlight/a28/index.html
(5) Haruna，M.，et al.：Force control technology of segment mirror exchange robot for Thirty Meter Telescope(TMT)，Proc. SPIE 9906，Ground-based and Airborne Telescopes VI（2016）
(6) Otsubo，S.，et al.：Modular Neural Network for Learning Visual Features，Routes，and Operation Through Human Driving Data Toward Automatic Driving System，JACII 2020，**24**，No.3，368～376（2020）