

日本バーチャルリアリティ学会研究報告

The 8th Workshop on Telexistence

第 8 回テレイグジスタンス研究会

2016年6月29日

日本バーチャルリアリティ学会

日本バーチャルリアリティ学会研究報告目次

CONTENTS

第8回テレイグジスタンス研究会／The 8th Workshop on Telexistence

〔主催：テレイグジスタンス研究委員会〕
〔Organized by Special Interest Group on Telexistence〕

2016年6月29日（水）15:00－18:00（東京大学）

TX01-1	Telexistence 実現のために求められるリアルタイム通信要件と標準化活動 中蔵聡哉(NTT コミュニケーションズ, 慶應義塾大学), チャリス・フェルナンド, 南澤孝太, 加藤朗, 砂原秀樹(慶應義塾大学), 舘璋(東京大学).....	1
TX01-2	集束超音波の使い方 星貴之(東京大学).....	5
TX01-3	テレイグジスタンス社会の法的問題－民法領域を題材として－ 赤坂亮太(慶應義塾大学).....	7
TX01-4	感覚・運動機能を拡張するウェアラブルアシストデバイス 栗田雄一(広島大学).....	11

Telexistence 実現のために求められるリアルタイム通信要件と標準化活動

Feature requirements of WebRTC for Real-time robot control (Telexistence) and standardization

中蔵聡哉^{1),3)}, チャリス・フェルナンド¹⁾, 南澤孝太¹⁾, 加藤朗¹⁾, 砂原秀樹¹⁾, 舘暲²⁾

Toshiya NAKAKURA, Charith FERNANDO, Kouta MINAMIZAWA, Akira KATO, Hideki SUNAHARA and
Susumu TACHI

1) 慶應義塾大学 メディアデザイン研究科
(〒 223-8526 横浜市港北区日吉 4-1-1, t.nakakura@kmd.keio.ac.jp)

2) 東京大学高齢社会総合研究機構
(〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

3) NTT コミュニケーションズ技術開発部
(〒 108-8118 東京都港区芝浦 3-4-1)

Abstract : The purpose of this study is to develop the best protocol for Telexistence over the Internet. Communication over the internet will be affected by network obstacles like delay, jitter, packet loss and etc. We examined the effect with our prototype and network simulator and grabbed the tendency in the Telexistence context. Our goal is the spread of Telexistence applications, therefore our prototype is based on one of the standard protocols named WebRTC in W3C and IETF. We have already submitted an update request as a third-party-feedback of WebRTC to W3C, and keep contributing to the WebRTC standardization to make the protocol ready for Telexistence.

Key Words: *Telexistence, WebRTC, Standardization*

1. はじめに

Telexistence[1] とは、遠隔地において高い現実感を持ち、あたかもその場にいるかのように活動することを支援する技術である。世界中に高速通信網が張り巡らされた現代においてこの技術を活用し、ロボットのような自己の代理となる身体を操作することができれば、物理的距離の概念から解放され、世界中どこに対しても身体インタラクションを行うことが可能になる。この構想実現に際しては、テレグジスタンスロボット及び操作環境そのものの普及と、ネットワークを経由して高度な操作を行うための通信技術の確立が不可欠である。本検討はこれらの実現に向けた取り組みを行うものであり、本稿は主に後者の課題である通信技術に関する取り組みについて記載する。

2. 通信技術の選定

2.1 市中の状況と求められる技術

2016 年時点において、全世界において最も普及率・接続人口の多いネットワークは、IP ネットワークをベースとするインターネットであるため、これの利用を前提とする。IP ネットワークの仕様上は、ネットワーク管理者により適切

に設定が成されれば、ネットワークに接続する任意の端末同士において直接接続が可能である。しかしながら実運用においては、セキュリティや IP アドレス枯渇の観点から、通信経路上に多数の Firewall や NAT が設置されており通信は制限されている。加えて、総務省による情報通信白書 ([2]) が示す通り、現在のネットワークトラフィックはサーバからクライアントへのダウンロードが主である。外部からの接続要求を積極的に受ける機器はサーバとして分類され、専門家の管理下にあるサーバ専用のネットワークに接続されるのが一般的であり、一般ユーザがアクセスするクライアント用のネットワークは、サーバからの折り返し通信の受信を主な機能として想定して設計されている。普及を前提にするのであるから、日常空間からアクセスできるクライアント用ネットワークにおいて、特別な設定を加えることなく接続を確立できることが望ましく、このような環境下でも接続できるプロトコルでなければならない。

直接接続を試みず、中継サーバを挟むことも考えられるが、高度な没入感を得るためには、操作者の意図した動作に対するロボットの反応をなるべく低遅延に押さえることが望ましく、通信遅延は可能な限り押さえる必要がある。一

一般的には中継を行わずに直接通信を行う方が低遅延であるため、直接的な通信を前提に検討を行い、接続確立に失敗した場合のフォールバック系としてサーバ中継モデルを検討する。

更には、独自に確立したプロトコルではなく、標準化団体により策定された仕様に沿って設計することで、参入障壁が低く相互接続性の高い仕様にするのが、普及に際して有利に働くと考えられる。

2.2 WebRTC の選定

我々は、WebRTC([3]) をベースに本取り組みの通信仕様を検討することとした。WebRTC は、W3C 及び IEEE によって標準化が進められている通信仕様である。WebRTC のプロトコルスタックは図 1 の通りである。

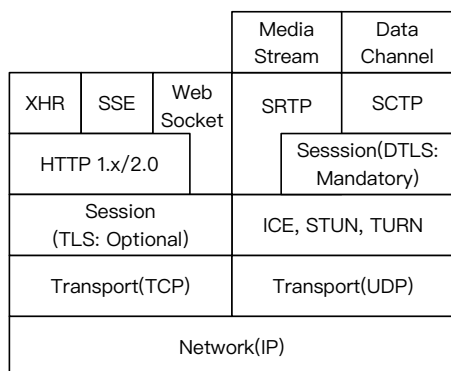


図 1: WebRTC のプロトコルスタック

プロトコルスタックのうち、ICE([4]) および STUN([5]) が直接通信を提供するために利用されるプロトコルである。これらの出力情報をクライアント間で交換することで、Firewall や NAT の配下にあるクライアントセグメント間であっても直接通信が確立できるようになる。ICE や STUN 自体は、直接通信確立前に交換する必要があるため、プロトコルスタック左側の TCP 部分のプロトコルを利用してサーバ中継を行う事によりクライアント間で交換を行う。直接通信確立後は、ユーザに通信ソケットが提供され、その中で映像と音声の通信を担当する MediaStream と、任意のデータの転送を担当する DataChannel が提供される。MediaStream に投入した映像や音声は、VP8([6]) 又は H.264([7]) で圧縮された後、SRTP([8]) パケットとしてネットワークに送出される。DataChannel で伝送するデータは SCTP([9]) のパケットに格納されて送信される。これらの通信は DTLS により暗号化が施される。ICE 及び STUN により直接通信の確立が失敗した場合は、TURN([10]) の機能により、中継サーバを利用する形で MediaStream と DataChannel が提供される。

通信の確立性能については、民間の調査会社 callstats.io のレポート ([11]) で利用統計が報告されている。カメラやマイクを備えていない端末で MediaStream を利用しようとしたケースのようなハードウェアの不備を除けば、通信確立成功/失敗の比率は 85:1 である。確立された通信のうち

直接接続できたものの比率は 78%で、残りの 22%が TURN によるサーバ中継である。通信が確立できない環境には、セキュリティを重視する企業ネットワークのように想定外の通信を意識的に遮断しているものも含まれており、100%にすることはそもそも不可能であること、その他のメリットとのトレードオフを考慮して、本用途にとっては十分なものとする。

3. Teleexistence ユースケースにおける WebRTC の通信性能評価

WebRTC を用いて十分な品質を持つ Teleexistence アプリケーションを作ることができるか検証を行った。まず評価用アプリケーションの実装を行い、実装を行うための十分な機能があるか確認した。次に実装したアプリケーションが十分な操作性を持つか評価を行った。操作性についての議論は、本来ユースケース毎に評価が必要な項目であり、汎用的な評価を行うためには体系だった評価基準そのものを策定する必要がある。本稿執筆時点においては評価用の試験実装を行い、プロトコルの仕様と照らし合わせる形で傾向の把握までを行っている。

3.1 試験用アプリケーションの実装

人間の頭部のみを模した Teleexistence ロボットを用いた試験実装を作成した。このロボットは、ヨー、ロール、ピッチの三軸で頭を動かすことができ、胴体を固定した際の人間の頭部移動を再現することができるものである。このロボットを用いた現時点の試験実装を図 2 に示す。

図中左上部、ユーザの装着したヘッドマウントディスプレイ (以下 HMD) のジャイロセンサーを用いてユーザの頭部方向を検出し、DataChannel を通じてロボット駆動用端末へ送信する。このジャイロセンサーはヨー、ロール、ピッチの 3 軸を備えており、ユーザが HMD を装着する際のキャリブレーションにより設定した原点に対し、頭部角度の絶対値になるよう加工を施した上で送信する。ロボット駆動用端末でこの値を受信し、同じ角度までロボットのサーボを動かすことで、ロボットをユーザの頭部に追従させる。

視覚に関しては、ロボットの右目と左目に相当するカメラから、それぞれ横 640 ピクセル縦 480 ピクセルの映像を取得して MediaStream で送信し、ユーザ用の操作端末内で 3D レンダリングを行い、HMD で表示を行う。

WebRTC のエンジンには Google Chrome、カメラには See3Cam CU130、HMD には Oculus Rift DK2、ユーザ操作端末はノート PC(Galleria QSF960HGS)、ロボット駆動用端末には Intel NUC 6i5SYH、ロボットのサーボには Herkulex 0201 を用いた。

今回の試験用アプリケーションでは実装を見送ったが、我々の所有する Teleexistence ロボットである TELESAR V([12]) は、操縦者の体の動きに合わせて動作し、自身の視覚、聴覚、触覚を操縦者へフィードバックするよう設計されている。WebRTC を用いて、TELESAR V や、味覚や嗅覚を持ったテレイグジスタンスロボットを動作させる場

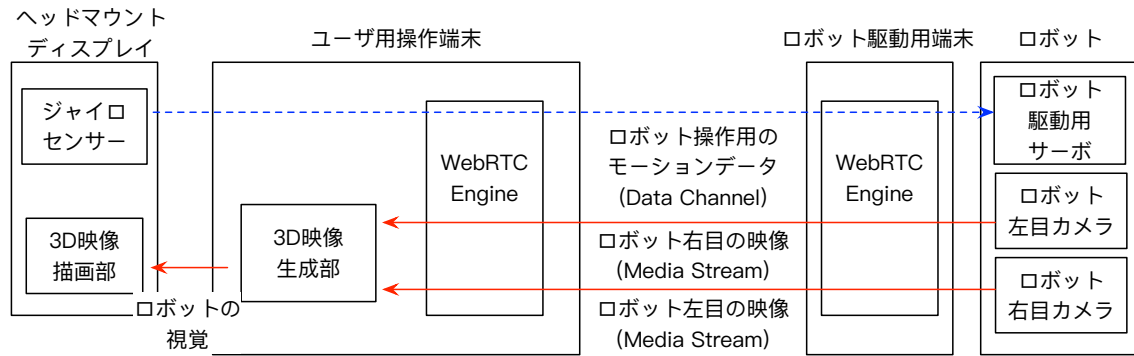


図 2: 評価用アプリケーションのモジュール構成

合は、触覚、味覚、嗅覚の情報は DataChannel を利用する事でユーザへ送信することができる。

3.2 模擬環境における評価実験

ネットワーク上で流れるパケットは、遅延、ジッタ、ロス、パケットの一部破損といったネットワーク特性による影響を受ける。これら进行评估するための環境を構築した。

インターネット回線を想定したネットワークシミュレータとして動作するソフトウェアルータ (VyOS) を設置し、ローカルセグメントを2つ作成する。操作用端末とロボット駆動用端末を別々のセグメントに接続し、ネットワークシミュレータを経由して通信を行う事で、双方向又は片方向の通信に対してネットワーク特性を設定することが可能である。この評価環境において得られた傾向について以下に記述する。

3.2.1 遅延・ジッタ

ネットワーク上において遅延が発生すると、操作信号、映像ともに送信から受信までにより多くの時間がかかることになる。IP ネットワークで発生する遅延は、通信負荷やネットワーク機器の負荷、通信経路の変更といった理由により変動するため一定ではなく、ゆらぎ、即ちジッタが発生する。

Telexistence の系全体としては、ユーザが体を動かしてからそれに合わせた信号が送信され、ロボットが駆動し、ロボットの目で観測した映像がユーザへ送られる。即ちユーザが体を動かしたと認識してから視覚でそれを確認するまでに、センサによるユーザ動作の取得、符号化、ネットワーク遅延、複合化、ロボットの物理駆動、カメラ映像の取得、符号化、ネットワーク遅延、複合化、3D レンダリングと表示を経る。遅延評価に際しては本来これら全てを検討する必要がある。但し符号化とネットワーク遅延及び複合化以外の点については、いかなる通信プロトコルにおいても共通のものであるため、本稿の検討からは除外する。

ジッタが発生しない固定遅延においては通信内容は変質せず、ユーザの認識に対して遅れが発生する。開発者を含む数名での評価においては、片道 10ms 以上の遅延が発生するとユーザが遅延を体感し始めた。片道 50ms 以上の通信遅延が発生すると、ほぼ全てのユーザに VR 酔いが発生し、長時間操作できない状態になった。ping コマンドを用いて実網での遅延の計測を行ったが、東京にある我々の研究室

から札幌に設置されたサーバまでの遅延が片道 12ms 程度、東京から米国西海岸に設置されたサーバまでの遅延が片道 75ms 程度であった。海外への通信を想定すると、動作の先読みのようなアプリケーション上の作り込みが必要になると考えられる。

ジッタに関しては、WebRTC の性質から、視聴覚情報とその他の伝送で別々の影響を受ける。視聴覚情報は MediaStream 内で SRTP として転送されるため、パケット自体にタイムスタンプがあり、到着が多少前後しても影響を受けない。DataChannel で送信されるデータについては SCTP で伝送されるためタイムスタンプがなく、アプリケーション側で独自に調整する必要がある。タイムスタンプでの吸収を検討する場合、再生までの間にバッファリングが必要になるが、ジッタが大きくなるにつれてバッファの幅が大きくなり、送信から再生までのタイムラグが大きくなる。実網のジッタについては iPerf コマンドによって計測を行ったが、東京～札幌間で 0.4ms、東京～米国西海岸で 4ms 程度であった。この程度であれば、ジッタがない場合と比較して、有意な操作感覚の悪化は観察されなかった。

3.2.2 パケットロス・一部破損

Telexistence アプリケーションにおいては、ロボットとユーザの体の間の同期が求められる。通信パケットが欠損した際に再送を行うのはかえってその同期を乱す元となるため、再送は検討しない。

まずロボットの動作について述べる。今回の実装においてはロボットの操作信号は絶対座標の連続値として送信したため、操作信号が欠損した際はロボットが沿って動くべき軌跡のうちの特定の点に関する情報が欠損することになり、動作がごちこちなくなる。これを緩和するためには、ロボットを動作させる前に移動平均を計算して動作させるような、アプリケーションの作り込みが必要になると考えられる。

視聴覚情報についてはまず品質の低下が観測された。VP8 や H.264 は圧縮後のデータの一部欠損を想定しており、更に WebRTC には通信品質に応じて自動的にビデオの品質を変更する仕様があるため、1%程度までのロスについては影響は観測されなかった。それ以上のロスが発生した際にはブロックノイズが発生する。

視聴覚情報については、品質の他に映像の同期ズレも観

測された。WebRTCにおいて、同一のMediaStreamのトラックとして入力された映像や音声は、SRTPのタイムスタンプで同期される仕様になっているが、それぞれのトラックは別々のパケットで伝送されるため、1つのパケットがロスした際に影響を受けるトラックは1つである。そのためパケットロスによって受ける影響はトラック毎に異なり、残されたパケットから複合された映像の同期ズレの原因となる。

Telexistenceアプリケーションにおいて同期ズレの影響は顕著である。左右の目の同期がズレると3次元加工が困難になり、立体視ができなくなる。ズレが大きいと左右の目で別々の地点を見ることになるため、ユーザの脳内で映像を処理することができなくなる。音声の同期がズレると音声方向の認識が崩れる。更に現在のWebRTCの仕様では触覚情報はタイムスタンプのないDataChannelで送信するため、影響はより顕著である。視覚と触覚の再現の同期がズレると、触覚の認識に影響が出ることが知られており、例えばWuら([13])は、映像に対し力覚のフィードバックが遅れることでバネの硬さの認識が崩れ、より柔らかいバネであるかのように誤認識するという報告を行っている。

この同期ズレについては、データを別々のパケットに格納すると避けられないため、全ての信号を同一のパケットにチャンクして送信するような機能が必要になる。これは現在のWebRTCの仕様がないため、別途検討が必要である。

4. 標準化への貢献

前章で記載した通り、現在のWebRTCの仕様をそのまま利用するだけでは、通信品質が低下した際にTelexistenceの要件全てを満たすことはできない。しかしながら、独自のプロトコルを策定して開発を進めては、普及の面において足かせになることが考えられる。我々は、Telexistenceユースケースからのフィードバックという形で、W3C及びIETFへ働きかけを行い、今後の追加要件策定へ貢献することを検討している。

既に2015年度のW3C TPACにおいて、その時点で観測された影響及び解決手法の案について、W3Cメンバーに対して報告済みである。更に、今後より定量的な評価と、緩和策の効果測定を行うため、独自の作り込みが行えるWebRTCエンジンを開発した。このエンジンを利用することで、より高度な映像圧縮アルゴリズムを利用すること、MediaStream及びDataChannelの仕様を拡張することが可能になる。今後このエンジンを用いて、WebRTCの拡張仕様としてプロトコルを開発し、標準化の場へフィードバックを行うことで、Telexistenceでも活用可能な仕様にするよう働きかけを行う予定である。

5. まとめ

本稿は、インターネットを超えてTelexistenceを実現するために必要な通信要件を洗い出すことを目的とし、普及を見据えて標準化された技術を用いた上で、テスト用のア

プリケーションを作成して評価を行った。インターネット上で想定される遅延やロスといったネットワーク特性が、Telexistenceアプリケーションに及ぼす影響を把握するため、ネットワークシミュレータで負荷をかけることで傾向の把握を行った。

今回把握された傾向については、より詳細な分析と解決のための手法の考案、それらの定量的な評価を行った上で標準化の場で報告し、Telexistence用途で活用可能な標準仕様を策定することを目標としている。

謝辞

WebRTC版のTelexistence評価アプリケーション作成に当たり、一般的なTelexistenceアプリケーションに必要なシステム構成や作り込みについて、技術協力を頂いた慶應義塾大学のムハマド・ヤメン・サライジ氏に感謝します。

参考文献

- [1] Susumu Tachi. *Telexistence*. World Scientific, 2010.
- [2] 総務省. 平成27年版情報通信白書, 2015.
- [3] W3C. WebRTC 1.0: Real-time communication between browsers. <http://dev.w3.org/2011/webRTC/editor/webRTC.html>.
- [4] IETF. Interactive connectivity establishment (ice): A protocol for network address translator (nat) traversal for offer/answer protocols, 2010.
- [5] IETF. Session traversal utilities for nat (stun), 2008.
- [6] IETF. Vp8 data format and decoding guide, 2011.
- [7] IETF. Rtp payload format for h.264 video, 2011.
- [8] IETF. The secure real-time transport protocol (srtp), 2004.
- [9] IETF. Stream control transmission protocol, 2007.
- [10] IETF. Traversal using relays around nat (turn): Relay extensions to session traversal utilities for nat (stun), 2010.
- [11] callstats.io. WebRTC - an analytics perspective. <http://www.slideshare.net/callstatsio/webRTC-an-analytics-perspective-by-callstatsio>.
- [12] Charith Lasantha Fernando, Masahiro Furukawa, Tadatoshi Kurogi, Sho Kamuro, Katsunari Sato, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi. Design of TELESAR V for transferring bodily consciousness in telexistence. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 5112–5118, 2012.
- [13] Bing Wu, Sung Hun Sim, Andinet Enquobahrie, and Ricardo Ortiz. Effects of visual latency on visual-haptic experience of stiffness. In *Quality of Multi-media Experience (QoMEX)*, pp. 1–6, 2015.

集束超音波の使い方

Applications of Airborne Ultrasound Focusing Device

星貴之¹⁾

Takayuki HOSHI

1) 東京大学 先端科学技術研究センター

(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, star@star.rcast.u-tokyo.ac.jp)

Abstract: High-intensity ultrasound is available in air at a focal point generated by an ultrasonic phased array. The sound pressure distribution is well localized and its position is arbitrarily controlled. These features expand the field of high-intensity ultrasonics to enable new applications.

Key Words: Airborne ultrasound, Phased array focusing, Acoustic radiation pressure, Acoustic levitation.

1. はじめに

筆者は空中の任意の位置に超音波焦点を形成する装置を開発し、その応用先を探索している[1]。これは従来の強力超音波研究に用いられてきたランジュバン振動子と比較して、以下の特長を持つ。

- 遠距離まで有効 (焦点距離 10-40 cm)
- 局在した超音波 (焦点直径 10-40 mm)
- 焦点を移動可能

これらの特長によって、強力超音波のこれまでの研究成果に新たな効果を付与することができる。

集束超音波の応用を考えるに当たり、どのような状況でどのような現象が生じるかを理解しておくことは重要である。本稿では、空中を伝搬する超音波の進行波および定在波、また超音波が液体表面に与える振動の効果についてそれぞれ説明し、応用例を紹介する。

2. 進行波

2.1 音響放射圧

超音波の進行波が物体によって遮られると、物体表面を超音波の進行方向に押す力が生じる[2][3]。これは音圧が小さいうちは無視されるが、音圧が大きくなると顕著に現れる非線形現象である。

平面波が物体表面に垂直に入射するときに生じる音響放射圧 P [Pa] は次式で表される。

$$P = \alpha E = \alpha \frac{p^2}{\rho_0 c^2} \quad (1)$$

ここで E [J/m³] は音響エネルギー密度、 p [Pa] は音圧の実効値、 ρ_0 [kg/m³] は空気密度、 c [m/s] は空気中の音

速である。 α は物体表面の反射特性に依存する係数であり全反射で 2、全吸収で 1、全透過で 0 をとる。液体や固体は空気 (気体) に対して音響インピーダンスが十分大きく超音波をほぼ全反射するため $\alpha=2$ と考えてよい。

2.2 応用例

空中触覚: 集束超音波を手指に照射することにより触覚を非接触で感じさせることができる[4]。発生する力は 16 mN (1.6 gf) と弱いため、同一箇所に照射し続けると順応によって感じなくなる。AM 変調による振動刺激や焦点の移動刺激などを用いる必要がある。

静電気分布計測: 帯電したフィルムシートに集束超音波を照射すると局所的に振動し、その電荷量に応じた電磁場の変化が生じ、近づくことなくアンテナで測ることができる。さらに焦点をスキャンすることで可動部なしに二次元分布を取得することが可能となる[5]。

人工授粉: イチゴなどの花を集束超音波により数 10 Hz で振動させて授粉を行う[6]。植物工場を巡回するロボットに深度カメラと超音波集束装置を搭載して、自動で授粉を行う研究を産学連携で進めている。

毛布への描画: 毛布の毛を立たせることでディスプレイにする研究において、非接触でそれを行うため集束超音波を採用した。毛を立たせる方向と寝かせる方向に超音波装置を二台配置し、描くだけでなく消すことも可能とした[7]。

3. 定在波

3.1 音響浮揚

超音波の定在波に波長よりも小さな物体が捕捉されて空中に浮く現象である。粒子の密度が空気よりも十分大きく、圧縮率が空気よりも十分小さいことを仮定すると、体積 V [m³] の微小粒子が定在波ビームの中で受ける力 F [N] は次式で与えられる[8]。

$$\mathbf{F} = -V \nabla U \quad (2)$$

$$U = -\frac{3}{2} \langle K_a \rangle + \langle P_a \rangle \quad (3)$$

ここで U [J/m³] は力学的ポテンシャルであり、粒子は U が低い方へ引き寄せられる。 K_a [J/m³]、 P_a [J/m³] は超音波の運動エネルギー密度、ポテンシャルエネルギー密度である。 $\langle \cdot \rangle$ は時間平均を表す。 ガウス関数のように中央で最大値をとるような断面分布の定在波ビームでは、粒子速度が最大かつ音圧が最小となる音圧の節において U は最小値を取る。 この節に引き寄せられる力が重力を上回るとき粒子は空中に浮くこととなる。

3.2 応用例

三次元音響浮遊：超音波集束装置を向い合せにして焦点を重ね、定在波ビームを形成する。これによって物体を浮揚させることができ、また焦点位置を連続的に変えることで浮かせたまま三次元的に移動させることができる[9]。

空気揺らぎの抑制：ヒーター上での画像計測において、温められた空気と常温の空気が混ざって視界が揺らぎ、誤差を生じる。視線を横切るように定在波を生じさせることでこれを安定化する[10]。冷たく密度の高い空気が音圧の節に、温かく密度の低い空気が腹に引き寄せられて混ざり合わないことが安定化に寄与している可能性がある。

4. 超音波振動

4.1 表面張力波（キャピラリー波）

液体表面を高周波で励振すると微細な波が生じる。これは表面張力を復元力とするものであり、その波長 λ [m] は次式で与えられる[11]。

$$\lambda = \left(\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{1/3} \quad (4)$$

ここで σ [N/m] は液体の表面張力、 ρ [kg/m³] は液体の密度、 f [Hz] は励振周波数である。例えば水の表面を $f=40$ kHz で励振する場合、 $\sigma=0.07275$ N/m (20 °C)、 $\rho=1000$ kg/m³ から $\lambda=105$ μm となる。界面活性剤などによって表面張力を低下させると波長はさらに短くなる。

4.2 応用例

反射制御：シャボン膜に超音波を照射して励振することにより、鏡面反射から拡散反射へ切り替えることができる[12]。反射状態の時分割制御によりプロジェクタから投影された映像のBRDFを変化させることができる。

液滴除去：超音波の振幅が大きくなるにつれて表面張力波の振幅も大きくなり、波頭が飛び散るようになる（超音波霧化）。これを利用して微小径孔に入り込んだ液体を加熱することなく除去する方法を提案している[13]。

参考文献

- [1] 星貴之：非接触作用力を発生する小型超音波集束装置の開発，計測自動制御学会論文集，vol. 50，no. 7，pp. 543-552，2014.
- [2] J. Awatani: Studies on Acoustic Radiation Pressure. I. (General Considerations), J. Acoustical Society of America, vol. 27, pp. 278-281, 1955.
- [3] T. Hasegawa, T. Kido, T. Iizuka, and C. Matsuoka: A General Theory of Rayleigh and Langevin Radiation Pressures, Acoustical Science and Technology, vol. 21, no. 3, pp. 145-152, 2000.
- [4] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda: Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound, IEEE Trans. Haptics, vol. 3, no. 3, pp. 155-165, 2010.
- [5] K. Kikunaga, T. Hoshi, H. Yamashita, Y. Fujii, and K. Nonaka: Measuring Technique for Static Electricity Using Focused Sound, Journal of Electrostatics, vol. 71, no. 3, pp. 554-557, 2012.
- [6] H. Shimizu, T. Hoshi, K. Nakamura, and J.-E. Park: Development of a Non-contact Ultrasonic Pollination Device, Environmental Control in Biology, vol. 53, no. 2, pp. 85-88, 2015.
- [7] 杉浦裕太，戸田光紀，星貴之，神山洋一，五十嵐健夫，稲見昌彦：Graffiti Fur: 被毛を有する布をディスプレイ化する手法，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，vol. 20，no. 2，pp. 151-161，2015.
- [8] 竹内正男：微小物体の超音波マイクロマニピュレーション，日本音響学会誌，vol. 52，no. 3，pp. 203-209，1996.
- [9] T. Hoshi, Y. Ochiai, and J. Rekimoto: Three-Dimensional Noncontact Manipulation by Opposite Ultrasonic Phased Arrays, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 53, 07KE07, 2014.
- [10] 星貴之，早田滋：画像計測高精度化のための超音波定在波による空気揺らぎの抑制，計測自動制御学会論文集，vol. 52，no. 10，採録決定，2016.
- [11] 土屋活美，林秀哉，藤原和久，松浦一雄：超音波霧化現象の可視化解析，エアロゾル研究，vol. 26，no. 1，pp. 11-17，2011.
- [12] 落合陽一，大山剛史，星貴之，暦本純一：コロイドディスプレイ：透明な薄膜を用いた反射制御ディスプレイ，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，vol. 18，no. 3，pp. 277-286，2013.
- [13] グェンフ ダン，高崎正也，水野毅，星貴之：プリント基板における超音波を利用した脱水に関する研究 -第 3 報：収束超音波による脱水-，2013 年度精密工学会春季大会講演論文集，pp. 767-768，2013.

テレグジスタンス社会の法的問題

-民法領域を題材として-

Legal Issues for Telexistence Society

-Civil Law as a Subject-

赤坂亮太¹⁾

Ryota AKASAKA

1) 慶應義塾大学 SFC 研究所

(〒252-0882 神奈川県藤沢市遠藤 5322, raks@sf.keio.ac.jp)

Abstract: In this paper, I described legal problems concern with Telexistence, especially about Civil law. Providers of Telexistence could be liable when legal incidents have happened. The liabilities are intermediary liability in tort liability and product liability. At first, I discussed intermediary liability in tort liability reference to Japanese leading cases. Next, I discussed product liability for software reference to Japanese and U.S.'s theories. In addition, I described some issues about private international law related with Telexistence.

Key Words: Robot law, Civil law, Tort liability Product liability. (3~4 個の英文キーワード)

1. はじめに

近時、テレプレゼンスロボットの普及にみられるように、遠隔地に影像および音声等従来の情報通信ネットワーク上でやり取りされていた情報以外の情報も含めたコミュニケーションが広く行われるようになってきた。このような状況をふまえ、このような技術が社会に浸透するにつれて生じうる法的問題としてロボット法なる法領域を想定し、それを対象とした研究や政策的検討も行われるようになってきた。

ロボットと法に関する問題の特徴として、Calo(2015)は、実体化(embodiment)創発性(emergence)社会的意味(social valence)という3点をあげているが[1]、テレグジスタンスロボットについては特にこの中の実体化と関係するだろう。すなわち、いままで情報による法的問題というのが発言や影像をめぐるものだったことに対し、ロボットにおいてはそれにより怪我をしたり、物権の損傷が生じたりするなどの問題が生じる。

本報告においては、特に民法の領域について解釈論を論じるが、方法論としては情報法における議論を並行して論じ、テレグジスタンスの利用という局面においてはどのように判断されうるか、という観点から論じることとする。

2. テレグジスタンスと媒介者責任

2.1 媒介者責任の考え方

テレグジスタンスのサービスを提供する場合、当該事業者が所謂「技術的ゲートキーパー」[2]として責任を負うことで規制をかけるという考え方がとられる可能性がある。事業者がこの媒介者責任を追いつけるか、については、

過去のプロバイダ責任に関する議論を参照することで明らかにすることができるだろう。我が国における媒介者責任のリーディングケースとしては、「ニフティーサーブ現代思想フォーラム事件」[3][4]「都立大学事件」[5]「ちゃんねるペット大好き掲示板事件」[6][7]の3件が代表的なものである。

2.2 判例から見る媒介者責任

ニフティーサーブ現代思想フォーラム事件は、パソコン通信の掲示板サービスにおける名誉毀損発言をめぐる事件である。ここで問題となったのは「シスオペ」なるフォーラムの管理人が名誉毀損発言に関して不法行為責任を負うべきか、であった。原審では「シスオペにおいて、その運営・管理するフォーラムに、他人の名誉を毀損する発言が書き込まれていることを具体的に知ったと認められる場合には、当該シスオペには、その地位と権限に照らし、その者の名誉が不当に害されることがないように必要な措置をとるべき条理上の作為義務があったと解すべきである。」として名誉毀損発言をみとめた時点で作為義務が発生するとした。他方控訴審においては原則論としては当事者間で解決すべきとしてプロバイダ等が条理上の義務を負うのは標的とされたものが救済手段を有さず、対策を講じてもおおまかしくない場合だとしている。またシスオペが常時監視し問題点をもれなく検討させる等の重い作為義務を課すかについては原審において1、発言が事前にチェックできない2、シスオペの多くが業務を専門にしているわけではない3書き込みが膨大な数にのぼることを理由に、負わせることは相当ではないとしている。

都立大学事件は管理下のネットワーク上での名誉毀損事

件である。この事件では、ウイルスを拡散してコンピューターを破壊するなどの行為と対比させ、被害の影響から責任の有無があるといった趣旨の判断がくだされている。前者は「一般人の日常の様々な生活利益を侵害する行為」であり「そのような行為の実行を妨げる手段を有する者」は、社会全体から被害発生防止のための一定の責任を負うことが要請」されている一方、後者は「基本的には被害者と加害者の両名のみが利害関係を有する当事」であって原則的にネットワーク管理者は私法上の義務を負わず、「加害行為の態様が甚だしく悪質であること及び被害の程度も甚大であることなどが一見して明白」であるなど例外的状況においてのみ責任をおうとした。

2ちゃんねる「ペット大好き掲示板」事件は匿名掲示板における名誉毀損をめぐる事件であり、匿名性をメルクマールとした判断がなされている。すなわち、原審においては「匿名で利用できる電子掲示板においては、他人の権利を侵害する発言が数多く書き込まれることが容易に推測され」るため、発言を削除するなどの措置を講ずべき条理上の義務があるとされ、控訴審においても匿名性を標榜することで「利用者の規範意識が鈍麻し、場合によっては他人の権利を侵害する発言などが書き込まれるであろうことが容易に推測される」とし、被害が拡大しないよう発言の削除を行う義務があると判示された。

2.3 私見

以上で見たとおり、媒介者責任があるとされるのは、①被害の状況を認める②被害者が救済手段を有さず、対策を講じても奏功しない時であるほかに、③被害の影響が大きい、悪質であることも要件とされ④匿名で利用できることを標榜するならば匿名での利用による不法行為の増加を鑑みて対策を講じなかった場合には責任があるとされた。さらに、常時監視義務については否定されている。

どのようなサービスをおこない、どの程度のことがロボットによって可能なのかによって、責任があるとされるのか無いとされるのかも変わりうるため、一概に言うことは難しいが、トレイグジスタンスロボットについて考え無くてはならないことは、被害はオンタイムで生じ、事後的な措置が難しいことである。

他方で、トレイグジスタンスロボットは、外形的には匿名性の高いロボットや必ずしも顔等の個人を識別しうる映像や画像を表示する必然性がない。このことは当事者間での解決を妨げ、また当然、2ちゃんねる「ペット大好き」掲示板事件で判示されたように匿名性による規範意識の鈍麻が生じうる。その意味において、実際に何かしらの事件があった場合には当該ロボットの情報発信内容について被害者から異議申し立てや停止の請求があった場合に遠隔操作ロボット提供事業者の責任が問われることとなるだろう。

3. 情報の製造物責任

3.1 製造物責任法の限界

製造物責任法の対象となる製造物は条文中「動産」に限定されており（製造物責任法2条1項）、ソフトウェアなどの情報は、インストールされていたり組み込みソフトウェアとして動産に組み込まれて一体となっていない限り含まないということが通説的立場である[7]（通産省、1994）。したがって、この通説に則れば、ロボットとコックピットを媒介するソフトウェアになんらかの瑕疵があっても製造物責任法によって責任を負うということはない。

しかしながら、消費者保護の観点から大量生産性などのいくつかの条件を設定し、ソフトウェアにも製造物責任法の対象を及ぼせることが妥当なのではないかという議論もある[8][9][10]。特にこの中で、ソフトウェア産業の企業が賠償を支払うだけの十分な資力、所謂ディープポケットを持つことを前提とした議論があるが、これは製造物責任法が大量生産大量消費という時代の中で個人と企業の非対称性を是正するという観点のもと作られてきた法であることを考えれば、政策目的と照らしあわせても妥当な考え方であるようにも思われる。

他方で、現代の状況を考え情報の製造物責任に否定的な態度を示す議論がある。Engstrom(2013)は、3Dプリンターを題材に、情報の製造が「民主化」されているために製造者＝企業という関係は切断されていることを指摘している。厳格責任としての製造物責任という考え方は企業対個人の情報の非対称性の中で発生した法理であるが、この同一性がなくなるという事態においては製造物責任法をそのまま適用することは問題がある。[11]

3.2 私見

情報の製造物責任という考え方は、見てきた通り通説的解釈では否定される。では消費者保護のためにそれを認めるべきかということ、Engstrom(2013)の議論のような懸念もある。製造物責任法が大量生産大量消費時代の企業と消費者の非対称性という構造の影響を強く受けていることを鑑みれば、今日の製造の民主化という観点からは問題点が多い。たとえ企業であっても所謂ディープポケットを有しているとは限らないこと（情報の製造は必ずしもディープポケットを有している企業によるものでないこと）は、情報の製造物責任を肯定する立場の論拠の一部を崩すものである。以上の理由により、情報の製造物責任については認めないという立場を取りつつ、保険などによって被害者が補償を受けられるなどの制度的対応を行うべきではないかと考える。

4. 国際私法上の問題点

4.1 国際私法の不法行為

ところで、情報通信ネットワークによる通信を想定すれば、当然に国際的な情報流通と問題発生時の責任という問題も重要となる。例えば、海外から操作したロボットにより事故が生じたらどうなるか、海外からの影響により国内の人が怪我をしたらどうなるか、といった問題である。ここでより具体的に法的な問題を明らかにするならば、どこ

の国の法律を適用すべきかという「準拠法の選択」という問題である。2006 年以降は、国際私法上の問題については「法の適用に関する通則法（以下、通則法）」という法律によって、定められている。

我が国における不法行為の国際私法上の扱いについては、通則法 17 条にて一般原則が定められている。そこでは「不法行為によって生ずる債権の成立及び効力は、加害行為の結果が発生した地の法による。ただし、その地における結果の発生が通常予見することのできないものであったときは、加害行為が行われた地の法による。」（通則法 17 条）とされている。

4.2 テレイグジスタンスと国際私法

さて、テレイグジスタンスによって生じる国際私法上の問題とは、加害行為地と結果発生地が異なる隔地的不法行為であるといえる。従来は、不法行為地を行動地とする説（行動地説）と結果発生地説が対立してきた。行動地説は行為者の意思活動に着目し不法行為の主観的要件を重視する考え方で、侵害行為が行われた場所を不法行為地とみなすものである。加害者の予見可能性の観点からは、こちらの考え方の方が適している。他方の結果発生地説は、実際に発生した損害とその補填を重視し、客観的要件に注目する。被害者保護の観点からは、こちらのほうが適している。通則法では、被害者保護の観点が重視され結果発生地説が採用されている。なお、「通常予見することのできない」とは主観的事実を問題とするのではなく、客観的な規範の問題として、諸事情を照らして予見可能なものであったか否かを趣旨としているとされる。[12][13][14]

4.3 両説の問題点

情報通信ネットワークの観点からは、行動地説は情報のアップロードと不法行為の間に必然性が見出しにくいことから否定される [15]。では結果発生地説に問題点がないかというところではない。この説の問題点として、結果が複数の場所で発生する場合がある。情報通信ネットワークの観点を考慮すれば、理論上はネットワークに接続された端末があるすべての国が結果発生地になり得る。これは、特に従前の情報通信ネットワークにおいて、名誉毀損やプライバシーの文脈で問題とされてきた。すなわち、複数国においてプライバシーを侵害する記事が閲覧可能な状態などを想定し、それにより複数国において法的利益が侵害されたとしよう。この場合の補償を求めるには各国の法律制度に則って複数国で出訴せねばならず、法的コストが高くなってしまう [16]。

このような問題点につき、通則法 20 条という特例条項が定められている。当該条項は、より密接な関係がある地がある場合について、次のように定められたものである。「第二十条 前三条の規定にかかわらず、不法行為によって生ずる債権の成立及び効力は、不法行為の当時において当事者が法を同じくする地に常居所を有していたこと、当事者間の契約に基づく義務に違反して不法行為が行われたことその他の事情に照らして、明らかに前三条の規定

により適用すべき法の属する地よりも密接な関係がある他の地があるときは、当該他の地の法による。」これは例外条項とされるもので、17 条に優先する。たとえば我が国の企業が海外のサーバーを経由してテレイグジスタンスロボットのサービスを提供し、それにより我が国の人物の資産が国内外で被害をうけたとしよう。結果発生地説に基づけば、損害賠償を請求するためには資産が破壊された地すべてで訴訟をおこす必要がある。しかしながら、被害者が日本人で加害者側も日本企業だとすれば、当事者が法を同じくする地に常居所を有しているとして日本が両者に密接に関わる土地であり、またここでいう「契約」はいわば例示であり当事者間に存在する物権関係に関連して不法行為が行われた場合も想定されているという説にたてば、当事者に最も密接な地は日本なのだから日本法で裁判が行われることになる。[14]

4.4 国際私法の不法行為に関する私見

とはいえ、海外の事業者を通じて複数国で我が国の国民の権利利益が侵害されたとすれば 20 条による特例は結果発生地説の問題点を改善するには不十分であるようにも思える。しかしながら、テレイグジスタンスロボットで複数国において当該個人の権利利益を侵害する行為を及ぼすことが、情報通信ネットワークによるプライバシーの侵害などにくらべて難しいことを考えれば、結果発生地説での問題は比較的起こりづらい。そうなれば、法的コストの高騰という問題はそこまで重要ではないようにも考えられる。したがって、私見としてはテレイグジスタンスの問題について結果発生地説をとる現行の通則法は支持されるように思える。

4.5 生産物の国際私法

ところで、ロボットが生産物として国際的に流通する上で情報の製造物責任が（私論では否定的にとらえたとはいえ）考慮されるならば、当然に国際私法の問題にあたって、製造物に関する責任を考慮しなくてはならない。通則法においては、18 条において、生産物の特例が設けられている。条文は次の通りである。「第十八条 前条の規定にかかわらず、生産物（生産され又は加工された物をいう。以下この条において同じ。）で引渡しが行われたものの瑕疵により他人の生命、身体又は財産を侵害する不法行為によって生ずる生産業者（生産物を業として生産し、加工し、輸入し、輸出し、流通させ、又は販売した者をいう。以下この条において同じ。）又は生産物にその生産業者と認めることができる表示をした者（以下この条において「生産業者等」と総称する。）に対する債権の成立及び効力は、被害者が生産物の引渡しを受けた地の法による。ただし、その地における生産物の引渡しは通常予見することのできないものであったときは、生産業者等の主たる事業所の所在地の法（生産業者等が事業所を有しない場合にあっては、その常居所地法）による。」ここでいう生産物とは、製造物責任法上の製造物の定義より広く、未加工の農水産物や不動産を含む幅広い概念であるとされる。情報も生産

されるものであると鑑みれば、この定義に入ることは（少なくとも製造物責任法よりも）自然であるように思われる。そして「生産物の引き渡しを受けた地」とは生産物の占有を法的に取得した地とする説と現実の自己の支配下においた地とする説があるが前者が通説だとされる。理由としては、前者においては法的に占有されることで被害者は生産物に支配権を、生産業者は引き渡し義務を完了するためであり、後者は被害者保護によりすぎているためとされる。[14]

4.6 生産物責任に関する私見

引き渡しを受けた地について、ロボットの引き渡しについては生産物の占有を法的に取得した地でも良いように思えるが、情報の責任を考えた時にはどうだろうか。そもそも、クラウド上にソフトウェアがあり、それを用いる場合は法的に占有するわけではなく、使用許諾を受けている状態である。本条文を、占有を例示の一つとして示しているのであって、法的な管理可能性を有した段階で引き渡しと解釈することは可能であるように思える。そうすると、例えば海外 A 国のユーザーが海外 B 国のサーバー上にあるソフトウェアを用いてロボットを操縦し、ソフトウェアの瑕疵によって操縦に問題が生じて日本国内で日本人が受傷するといった場合、法的な管理可能性は B 国サーバーと通信した時に発生するのだから、B 国法が適用されるということになると考えられる。もっとも、日本人同士、日本企業対日本人といった関係においては、前述の 20 条の適用があり、日本法が適用されるように思われる。

5. まとめにかえて

以上、今日の私法領域においてトレイグジスタンスが私法上問題となる時の法解釈論について論じてきた。しかしながらトレイグジスタンスを用いた雇用など、更に考えなくてはならない課題はあり、これは今後の研究としたい。さらに、トレイグジスタンスを用いた傷害事件などを考えれば、当然刑法領域の議論も必要であるように思われるが、

これも今後の研究とする。

参考文献

- [1] Calo, R. ; Robotics and the Lessons of Cyberlaw, 103 CAL. L. REV , 2015.
- [2] Zittrain, J., : A History of Online Gatekeeping, 19, HARV.J.L.&Tech 253, 2006.
- [3] 東京地判 1997・5・26 判時 1610 号 22 頁
- [4] 東京高判 2001・9・5 判タ 1088 号 94 頁。
- [5] 東京地判 1999・9・24 判時 1707 号 139 頁。
- [6] 東京地判平成 14 年 6 月 26 日判時 1810 号 78 頁。
- [7] 東京高判平成 14 年 12 月 25 日判時 1816 号 52 頁
- [8] Zollers, F. E., McMullin ,A. , Hurd, S. N., and Shears, P., : No More Soft Landings for Software: Liability for Defects in an Industry That Has Come of Age, 21 Santa Clara High Tech. L.J. 745, 2004.
- [9] Weber, Lori A. : Bad Bytes: The Application of Strict Products Liability to Computer Software, St. John's Law Review: Vol. 66:Iss. 2, Article 7., 2012.
- [10] 川和功子「情報と製 物責任法について(一)」同志社法学 59 巻 6 号, 2007.
- [11] Engstrom, N. F., "3-D Printing and Product Liability: Identifying the Obstacles" PENN. L. REV. 162, No. 35 (2013).
- [12] 神前禎, 早川吉尚, 元永和彦 : 国際私法 (第 3 版), 有斐閣アルマ, 2012.
- [13] 櫻田嘉章 : 国際私法 (第 6 版), 有斐閣, 2012.
- [14] 小出邦夫編 : 逐条解説 法の適用に関する通則法, 商事法務, 2014.
- [15] 道垣内正人 : インターネット国際取引と国際私法, 法とコンピュータ (22), pp31-37, 2004.
- [16] 羽賀由利子 : 国際私法から見る「忘れられる権利」, 金沢法学, 58 巻 1 号, pp61-82, 2015.

感覚・運動機能を拡張するウェアラブルアシストデバイス

Human Interface to Enhance Human's Sensory and Motor Capabilities

栗田雄一¹⁾

Yuichi Kurita

1) 広島大学 大学院工学研究院

(〒 739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1, kurita@bsys.hiroshima-u.ac.jp)

Abstract : In this paper, we introduce wearable human interfaces that can enhance human's sensory and motor capabilities. (1) The sensorimotor-enhancing suit (SEnS) is an assistive cloth that can unload human muscle effort. We confirmed that unloading muscle effort contributes to improve force reproduction capability. (2) The sensorimotor enhancer utilizes stochastic resonance effect to improve human's tactile perception. The experimental results show that appropriate sub-sensory vibration improve tactile sensitivity.

Key Words: Human augmentation, Wearable assistive device, Sensory and motor capabilities

1. はじめに

電動モータや空気圧アクチュエータを内蔵した着脱式機器や、支援対象を限定することでコストを抑えたスータイブなどの運動アシスト機器が開発されている [1, 2]。我々も、パッシブ機構による低コストな身体運動支援を目指し、伸縮性生地を用いて上肢の筋負担を軽減するスーツ SEnS (Sensorimotor Enhancing Suit) を開発している [3]。提案するスーツは、適切な筋負担軽減により、人の感覚運動機能を高めることのできることを確認している点に特徴がある。人の感覚運動機能を高める別の方補うとして、適切な外部刺激を与えることで、知覚感度を向上させる、というアプローチもある。確率共鳴 (Stochastic resonance) 現象とは、非線形のシステムにおいて、検出閾値以下のノイズ付与により、外部信号の検知能力が向上する現象である。我々は、確率共鳴を利用して、閾値以下の微小な振動を指先に与えることで、触覚感度を向上させる指先装着型デバイスを開発している [4]。

本稿では、この 2 つの人の感覚と運動の機能を拡張するウェアラブルアシスト機器について紹介する。

2. 力再現能力を向上させるスーツ : SEnS

Fig. 1 は、SEnS (Sensorimotor Enhancing Suit) の外観である。SEnS は、伸縮性生地とそれを身体に固定するための機構を有しており、伸縮性構造の一方は胸部に、もう一方は上腕に固定されている。この構造によって、前腕が前方に出るように肘関節を屈曲させるとき、前腕の自重により発生する肘周りの伸展モーメントの一部を伸縮性の生地により発生する張力で打ち消すことができ、姿勢維持に



図 1: Developed sensorimotor-enhancing suit for two arms

かかる筋負担を減少させることができる。

SEnS 着用／非着用時に、人が一度覚えた力を再現する精度を評価する実験を行った。12 人の被験者に対して、SEnS 着用／非着用のそれぞれの条件において、おもりを腕につるし、まずそのおもさを覚えてもらう。次におもりを外した後、力センサに対しておもりを保持するのに必要だった力と同じ力を出してもらう。このときのおもりの重量と、力センサで計測された力の間の違いを評価した。500g, 1000g, 1500g, 2000g のおもりを使用した時の結果を Fig. 2 に示す。実験の結果、SEnS 着用と非着用の間に、統計的に有意な差を検出した ($F(1, 88) = 2.22, p < 0.029$)。このことは、SEnS により筋負担を軽減させることが、人の力再現能力を

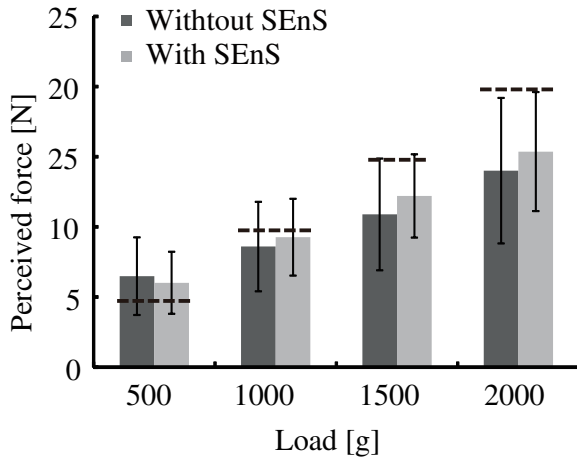


図 2: Perceived force against various loads with and without partial mitigation using SEnS. Dashed lines indicate forces caused by the applied loads.

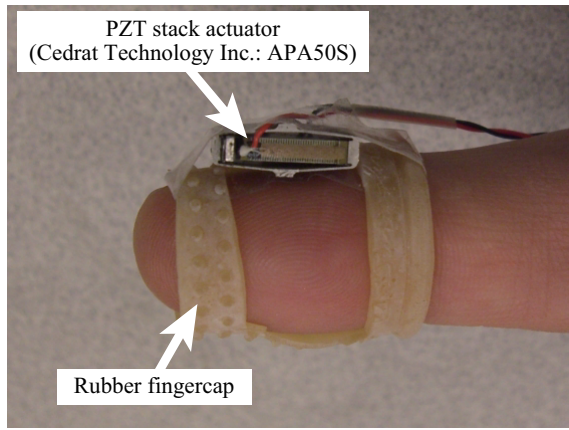


図 3: Fingercap-type sensorimotor enhancer

向上できることを示唆している。詳細については、[3] を参照いただきたい。

3. 確率共鳴を利用した指先触覚知覚感度の向上

ウェアラブルな触覚知覚感度向上デバイスは、精緻な操作が必要だったり、疾患や環境の影響により知覚感度が鈍ったりするような状況において役立つことが期待される。そこで我々は、確率共鳴による知覚向上効果が触覚においても生じることを確認するとともに、Fig. 3 に示すようなウェアラブルデバイス化した感覚アシスト機器を提案している[4]。

指先の触覚において振動強度が変化した場合の知覚向上効果のメカニズムは必ずしも解明されていないが、触覚受容器を興奮性ニューロンと考えた場合、振動強度が変化したときの知覚向上効果は、加算ネットワークモデルを用いたシミュレーションで評価できる。我々は、Collins らが提案した加算ネットワークモデルを用いた解析 [5] を応用し、手指内部の触覚受容器に対する振動強度と触覚知覚感度向

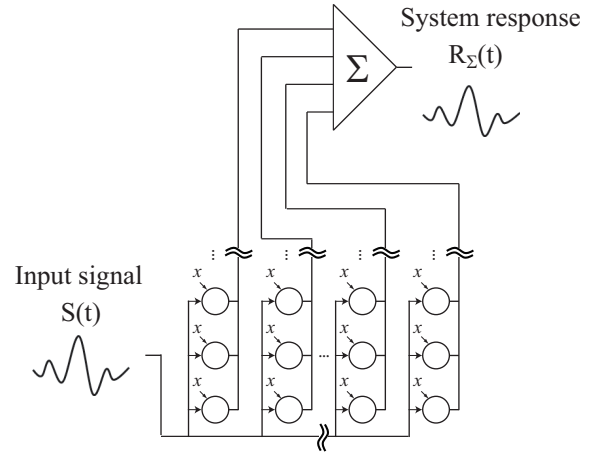


図 4: A summing network of excitable neurons

上効果について考察した。シミュレーションによる考察の結果、デバイスの振動アクチュエータが与えるべき振動強度は、知覚閾値付近に設定することが有効であることを確認した。詳細については [4] を参照いただきたい。

4. おわりに

本稿では、筋負担軽減や振動刺激によって人の知覚感度を向上させ、結果として運動機能を向上させる、というアプローチによる 2 つの研究開発例を紹介した。ウェアラブルな感覚運動機能向上デバイスは、精緻な操作が必要だったり、疾患や環境の影響により知覚感度が鈍ったりするような状況において役立つことが期待される。今後は、使用者個人の特性や、使用状況に応じた支援力、刺激強度のチューニングが課題になるであろう。

参考文献

- [1] K. Suzuki, G. Mito, H. Kawamoto, Y. Hasegawa, and Y. Sankai. Intention-based walking support for paraplegia patients with robot suit hal. *Advanced Robotics*, 21(12):1441–1469, 2007.
- [2] Y. Imamura, T. Tanaka, Y. Suzuki, K. Takizawa, and M. Yamanaka. Motion-based-design of elastic material for passive assistive device using musculoskeletal model. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 23(6):978–990, 2011.
- [3] 栗田雄一, 小池祐輝, 田中孝之, 辻敏夫. 感覚運動機能を向上させるウェアラブルスーツ:SEnS –第二報:両腕の補助が可能なスーツの開発–. 第 33 回日本ロボット学会学術講演会, pages RSJ2015AC2A2–04, 2015.
- [4] Y. Kurita, M. Shinohara, and J. Ueda. Wearable sensorimotor enhancer for fingertip using stochastic resonance effect. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 43(3):333–337, 2013.
- [5] J. J. Collins, C. C. Chow, and T. T. Imhoff. Stochastic resonance without tuning. *Nature*, 376:236–238, 1995.

日本バーチャルリアリティ学会研究報告

VR 学研報 Vol.21, No. TX01

第 8 回テレイグジスタンス研究会

©2016 by the Virtual Reality Society of Japan (VRSJ)

発行者 日本バーチャルリアリティ学会

〒113-0033 東京都文京区本郷 2-28-3 山越ビル 301

TEL 03-5840-8777 / FAX 03-5840-8766

e-mail office@vrsj.org

The Virtual Reality Society of Japan

Yamakoshi Bld. #301, 2-28-3 Hongo, Bunkyo-ku,

Tokyo, 113-0033 Japan

禁無断転写・転載