## 日本バーチャルリアリティ学会研究報告

The 14<sup>th</sup> Workshop on Telexistence

第14回テレイグジスタンス研究会

2019年7月19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

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

## 2019年7月19日(金)14:00-17:00 (大阪大学)

TX01-1	身体性拡張と建機遠隔操作システム 佐藤勇起(立命館大学)	1
TX01-2	接近時の歩行者とアバタの相互回避運動	_
	黒川正崇, 古川正紘, 前田太郎(大阪大学)	Э



## 身体性拡張と建機遠隔操作システム

Extended Embodiment and Tele-operation Construction Robot Control System

佐藤勇起 <sup>1)</sup> Yuki SATO

1) 立命館大学 情報理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1, satoyuki@fc.ritsumei.ac.jp)

**Abstract:** Studies on the rubber hand illusion have shown that our embodiment (the sense of body ownership and the sense of agency) can be extended outside of our own body. Meanwhile, researches on tele-operation construction robot have shown that the operator's sense of reality is reduced, and visually induced motion sickness occurs. One of the causes of the problems may be the loss of embodiment over the construction robot due to the lack of somatosensory and vestibular information. In this presentation, after an overview of the presenter's researches on extended embodiment, an idea of the tele-operation construction robot control system with extended embodiment is discussed.

Key Words: Extended embodiment, Transparency, Agency, Ownership, Tele-operation construction robot.

#### 1. はじめに

#### 1.1 身体性拡張

身体性(身体表象)が道具にまで拡張するということが、 熊手を使用したニホンザルの Bimodal Neuron (視覚刺激と 体性感覚刺激の両方に反応する神経細胞)の受容野を計測 する実験などにより示唆されている[1].

身体性拡張において重要な概念の一つに「道具の透明性 (注意のシフト)」がある[2]. 道具の透明性とは、初めて 道具を使用する際、注意は主に道具に向けられるが、使い 慣れるにつれて、注意は道具から外界(目的)へと移り、 無意識で道具を扱えるようになることの比喩である. 例え ば、初めてタイピングする際、注意は主にキーボードに向 けられるが、ブラインドタッチできるようになるにつれて、 キーボードは無意識で操作し、注意は文章の内容に向けら れる. 食事の時の箸や、視覚障害者の白杖も無意識で操作 され、注意は料理や障害物などに向けられ、道具は透明化 する.

また、身体性拡張において重要な概念として、運動主体感(sense of agency: SA)と身体所有感(sense of ownership: SO)がある[3]. SAは、自分が手を動かしているといった「行為を引き起しているのは自分だ」という感覚のことであり、SOは、痛いのは自分の歯だといった「経験を受けているのが自分だ」という感覚のことである. SAは、運動指令の遠心性コピーに基づく感覚結果の予測と、実際の感覚結果が一致する場合に感じられると考えられている[4]. 感覚結果に時間的遅延があり予測からずれると、ずれの大きさに比例して SA が低下することが知られ

ている[5]. SO が外部の物体に拡張する例としてラバーハンド錯覚(rubber hand illusion: RHI)が知られている[6][7]. RHI は、視覚的に隠された自分の手と、目の前に置かれたゴム製の手が同時に繰り返し触られることにより、次第にゴム製の手が自分の手であるかのような感覚が生じるというものであり、視覚情報と体性感覚情報の一貫性によって SO が転移することを示唆している. RHI と同様の現象は、ヘッドマウントディスプレイ(head mounted display: HMD)を用いた仮想現実(virtual reality: VR)環境[8]や、遠隔操作したアンドロイド[9]に対しても確認されている.

#### 1.2 建設機械の遠隔操作

他方,大規模災害からの迅速かつ安全な復旧などを目指し、建設機械の遠隔操作の研究開発が行われているが、直接搭乗して操作する時と比べて臨場感が低下し、作業効率が低下することが問題である。臨場感が低下する原因として、遠隔操作の送受信信号の遅延や、視覚や体性感覚情報の不足が考えられる。遠隔操作の送受信信号の遅延の問題は、"robot hand illusion (RoHI)"の研究において、視覚と体性感覚の時間的不整合による身体性(SA, SO)の喪失として研究されてきた[10]. Ismail らは、データグローブと同期して動くバーチャルハンドに SA, SO が拡張するか調査した。その結果、送受信信号の伝送遅延が 190 ms以下であれば拡張したが、290-490 ms で SO が喪失し、590 ms で SA も喪失することが明らかになった。この結果は、身体性が十分拡張するためには、視覚と体性感覚の時間遅延を 200 ms 以下にする必要があることを示している.

視覚情報の不足による臨場感の低下を改善するために, 大画面を用いて高解像度かつ両眼立体の映像をオペレー タに提示した研究では、作業効率が改善したものの、建設 機械の旋回動作時に映像酔い(VR酔い)が生じるとして否 定的な評価があった[11]. 動揺病の原因として有力な「感 覚矛盾説」によると、酔いは、実際の感覚と過去の経験か ら予測される感覚との矛盾により生じると考えられてお り、映像酔いは、自分が動いているような視覚情報を得て いるのに, 実際の身体は止まっているという, 視覚情報と 前庭感覚情報の矛盾から生じると考えられる. 映像酔いを 軽減するために、画面を小さくし、立体映像の飛び出し量 を減らす等の映像装置側での対策や, 旋回を低速化(例: 10 deg/sec 以下) するなどの操作者側での対策が考えられ ている.しかし、この対策では臨場感が低下し、作業効率 の低下を招く恐れがある. 臨場感を低下させることなく映 像酔いを低減する方法が必要である.

そこで、本稿では、身体性拡張(道具透明性、SA・SO) や動揺病、建機の操作快適性に関する著者らのこれまでの 研究を概観した上で、最後に、身体性が拡張することで臨 場感が向上し、映像酔いが軽減する建機遠隔操作システム の構想について議論する.

# 2. 身体性拡張 (道具の透明性) に関するコンピュータシミュレーション及び心理物理実験

著者らは、身体性拡張において重要な概念の一つである「道具の透明性(注意のシフト)」に関するコンピュータシミュレーションモデルを、飯塚らによる「風車モデル[12]」を拡張することにより構築した[13]. 風車モデルは以下のようなものである(図1(左)・Windmill model).人工神経回路モデルを搭載し、腕を持ったエージェントを用意する. エージェントは腕で風車を回転させ、腕の角度の情報から、風車の羽の枚数(5か7枚)を識別する. 神経回路のネットワークを遺伝的アルゴリズムで進化させた結果、エージェントは風車の羽の枚数を正しく識別できるようになった.

さらに、1台目の風車につづけて2台目の風車を配置し、1台目の風車を回すと2台目も回るようにした(図1 (右)・Coupled windmill model). そして、同様にエージェントを進化させることで、風車に対する「注意」の異なる2タイプのエージェントを構築できることを示した. 1台目の風車に注意を向けているエージェント1は、1台目の風車の羽の枚数を識別し、2台目の風車の羽の枚数は無視した. 2台目の風車に注意を向けているエージェント2は、1台目の風車の羽の枚数を無視して、2台目の風車の羽の枚数を識別した. エージェント1にとって1台目の風車は観察対象であり、2台目の風車はノイズである. よって、エージェント1の身体性は1台目の風車にまで拡張していないと考えることが出来る. 他方、エージェント2にとって1台目の風車は観察手段となり透明化し、2台目の風車が観察対象となっている. よって、エージェント2の

身体性は1台目の風車にまで拡張していると考えることができる.

さらに、二重風車モデルを実際に構築し、人を対象とした心理物理実験を実施した。コンピュータシミュレーションと心理物理実験の結果、観察対象としての風車を観察手段として用い、身体性が拡張する段階で、風車の回転に規則的な運動の構造が出現することが明らかになった。

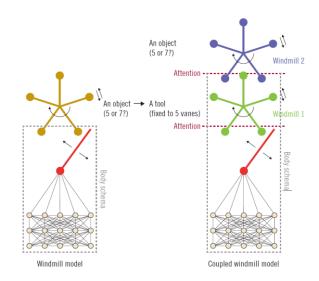
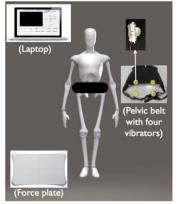


図 1:身体性拡張(道具透明性)に関する風車モデル[13]

# 3. 脳卒中後片麻痺患者の身体性の改善を目的とした知覚支援システム

著者らは、脳卒中後片麻痺患者の身体性の改善を目的とした知覚支援システムの研究開発を行い、触覚フィードバック型重心バランストレーニングシステムなどを開発した[14][15][16]. 図2に示す通り、骨盤ベルトに装着した4か所の振動子が足圧中心位置の偏り(前後左右)に対応して振動することで、片麻痺患者の減弱した体性感覚を支援する. 健常者と脳卒中片麻痺患者による実験の結果、システムの介入により立位時の重心動揺面積が減少し、訓練効果(バランス能力の向上)を確認した[15][16].



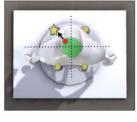


図 2:触覚フィードバック型重心バランストレーニングシステム[15]

# 4. 前腕切断者の筋電義手に対する身体性 (SA・SO) 拡張

著者らは, RoHI の研究を応用し, 健常者 (15 名) と前 腕切断者(3名)を対象に、筋電操作した義手に対する身 体性 (SA・SO) 拡張を評価した[18]. 椅子に座った被験者 の前にボードを水平に置き,ボードの上部に義手を,ボー ド下部に被験者の手を配置した(図2・左).被験者の前 腕に電極を貼り、筋活動を計測した. 被験者は手首を屈 曲・伸展し、ボード上部の義手が筋活動と同期して動くの を注視した (図2・右). 被験者の手と義手が同じ方向に 動く同位相条件と、逆方向に動く逆位相条件があった。実 験終了後のアンケートにて, SO, SA を 7 段階 (-3 から+3) で主観評価した結果,同位相条件において,S0値,SA値 が0に比べて有意に大きくなり、健常者および切断者の身 体性が筋電義手へ拡張することが示された. 逆位相条件で は、SO 値は有意に低下し喪失したのに対して、SA の低下 は小さかった.この結果は、SOが生じるためには、視覚と 体性感覚の空間的に整合性が必要であるのに対して, SA が生じるためには,両者に時間的整合性があり予測可能で あれば十分であることを示唆している.

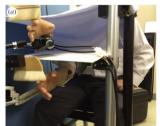




図 3:筋電義手に対する身体性 (SA・SO) 拡張の評価[18]

#### 5. 動揺病の軽減

著者らは、動揺病の原因として有力な感覚矛盾説に基づき、頭部運動(6自由度)から酔いの発症率(MSI: motion sickness incidence)を推測する動揺病数理モデル(6DF-SVC model、図4)を開発し、車酔いを軽減する車両の研究開発を実施した。旋回時に旋回方向内側に車体が倒れこむようなリーン運動を行う車両を開発し、スラローム走行実験を行った結果、リーン機能の付加により、頭部運動が誘発され、動揺病が軽減することが明らかになった[19]。

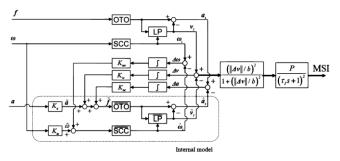


図4: 動揺病の数理モデル (6DOF-SVC model) [19]

#### 6. 建機操作快適性の生理指標

著者らは、建機の操作快適性を生理指標により客観的に評価可能か検証するために、油圧ショベルの操作時のストレスについて、アンケートと心電図によって調査した[20]. 実験の結果、油圧ショベル操作時の主観的ストレスと心拍数に正の相関があり、建機操作の快適性を心拍数により評価できる可能性が示唆された.

#### 7. 身体性が拡張する建機遠隔操作システム

最後に、著者が現在研究開発に従事している、身体性が拡張する建機遠隔操作システムの構想について議論する。本研究の目的は、建機の遠隔操作が身体性に与える影響を評価することで、自分の身体のように快適に操作可能な方法を明らかにすることである。著者は上記の研究から、建機遠隔操作における感覚結果の予測と、実際の感覚結果を一致させ、視覚と整合的な体性感覚(力覚、固有感覚)や前庭感覚をオペレータへ提示することで、身体性(SA・SO)が拡張し、臨場感が向上し、映像酔いが軽減するという仮説を立てた。

仮説を検証するために使用する建機遠隔操作システム (シミュレータ)の概要を示す (図5). 建機の実機に比べて実験条件の統制,変更が容易なラジコンを用いる. HMD を装着した操作者が 3D・360 度カメラを取り付けたショベルのラジコンをジョイスティックで旋回させる. 視覚と同期した前庭感覚を提示するために,ショベルの旋回に同期して操作者の座席も旋回させる. また, 視覚と同期した触覚を提示するために,バケットの力覚を操作者に提示する.

実験では、掘削や、土砂の運搬などの課題を実施する際の、遠隔操作の送受信信号の時間遅延や、操作者への体性感覚や前庭感覚の提示の有無が身体性(SA、SO)や映像酔い、作業効率、操作快適性に与える影響を評価する。また、操作者の視線を計測することで、操作者の注意がどこに向けられているのかを評価する。身体性が拡張し、道具が透明化するためには、オペレータの注意が、建機の操作レバーやバケットなどから、掘削対象や、建機の周囲に移り、無意識で建機を操作できるようになる必要がある。



図 5:建機遠隔操作システム (シミュレータ)

#### 8. 結論

道具に身体性が拡張することがラバーハンド錯覚などの研究により明らかになっている一方,建機遠隔操作においては,直接搭乗しているような臨場感が得られず,映像酔いが生じることが問題である.建機遠隔操作における感覚結果の予測と,実際の感覚結果を一致させ,視覚と整合的な体性感覚や前庭感覚を操作者へ提示することが,身体性の拡張や,映像酔い,臨場感に与える影響を検証する必要がある.

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 19K20093 の助成を受けたものである.

#### 参考文献

- [1] Iriki A, Tanaka M, Iwamura Y. Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurones. Neuroreport 7, pp. 2325-2330, 1996
- [2] Dobromir GD, Lin N, Anthony C. A demonstration of the transition from ready-to-hand to unready-to-hand, PLoS ONE 5(3): e9433, 2010
- [3] Gallagher S. Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science. Trends in Cognitive Science 4, pp. 14–21, 2000
- [4] Frith CD, Blakemore SJ, Wolpert DM. Abnormalities in the awareness and control of action, Philosophical Transactions of the Royal Society B 355, pp. 1771-1788, 2000
- [5] Sato A, Yasuda A. Illusion of sense of self-agency: discrepancy between the predicted and actual sensory consequences of actions modulates the sense of self-agency, but not the sense of self-ownership, Cognition 94, pp. 241-255, 2005
- [6] Botvinick M, Cohen J. Rubber hands 'feel' touch that eyes see. Nature 391, p. 756, 1998
- [7] Kalckert A, Ehrsson HH. The moving rubber hand illusion revisited: comparing movements and visuotactile stimulation to induce illusory ownership. Conscious and Cognition. 26, pp. 117-132, 2014
- [8] Lenggenhager B, Tadi T, Metzinger T, Blanke O. Manipulating bodily self-consciousness, Science 317, pp. 1096-9, 2007
- [9]渡辺哲矢, 西尾修一, 小川浩平, 石黒浩:遠隔操作アンドロイドへの身体感覚の転移, 電子情報通信学会論文誌, vol.J94-D, no.1, pp. 86-93, 2011
- [10] Ismail MAF, Shimada S. 'Robot' hand illusion under delayed visual feedback: relationship between the

- senses of ownership and agency, PLoS ONE 11(7): e0159619, 2016
- [11] 国立研究開発法人土木研究所,国立研究開発法 人情報通信研究機構:建設機械の遠隔操作技術向上に 関する共同研究報告書,第 489 号,2016
- [12] Iizuka H, Ikegami T. Emergence of body image and the dichotomy of sensory and motor activity. In proceedings of the symposium on Next Generation Approaches to Machine Consciousness, pp. 104-109, 2005
- [13] Sato Y, Iizuka H and Ikegami T. Investigating extended embodiment using a computational model and human experimentation, Constructivist Foundations 9(1), pp. 73-84, 2013
- [14] Yasuda K, Sato Y, Iimura N, Iwata H. Allocation of attentional resources toward a secondary cognitive task leads to compromised ankle proprioceptive performance in healthy young adults, Rehabilitation Research and Practice, 2013
- [15] Yasuda K, Sato Y, Iimura N, Iwata H. Novel supplementary tactile biofeedback system supplying online center of foot pressure displacement for a balance training rehabilitation, International Journal of Physical Medicine & Rehabilitation 1(6), 2013
- [16] 安田和弘, 佐藤勇起, 貝吹奈緒美, 原島宏明, 新見昌央, 岩田浩康: 脳卒中による重度深部覚障害例 に対する体感型バイオフィードバック装置の使用経験 -足圧中心位置を振動呈示することで体性感覚情報を 補完するヒューマン・マシン・インターフェースの開発-, 脳科学とリハビリテーション Vol. 14, 2014
- [17] Sato Y, Kawase T, Takano K, Spence C, Kansaku K. Incorporation of prosthetic limbs into the body representation of amputees: Evidence from the crossed hands temporal order illusion, Progress in Brain Research 236, pp. 225-241, 2017
- [18] Sato Y, Kawase T, Takano K, Spence C, Kansaku K. Body ownership and agency altered by an electromyographically controlled robotic arm, Royal Society Open Science 5: 172170, 2018
- [19] Sugiura T, Wada T, Nagata T, Sakai K, Sato Y. Analysing Effect of Vehicle Lean Using Cybernetic Model of Motion Sickness, The 14<sup>th</sup> IFAC/IFIP/IFORS/IEA symposium on Analysis Design and Evaluation of Human – Machine Systems, 2019
- [20] 佐藤勇起,和田隆広,滝下竜夫,高橋究,田中 友幸,樋口隆司:油圧ショベル操作の主観的ストレス の心拍数による評価,第19回建設ロボットシンポジウム,2019



## 接近時の歩行者とアバタの相互回避運動

Mutual Avoidance Movement of Pedestrian and Avatar at Approach

黒川正崇 <sup>1)</sup>,古川正紘 <sup>1)</sup>,前田太郎 <sup>1)</sup> Masataka Kurokawa, Masahiro Furukawa and Taro Maeda 1) 大阪大学 情報科学研究科

(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-4 CiNet, {masataka-kurokawa, m.furukawa, t maeda}@ist.osaka-u.ac.jp)

**Abstract:** The robot moved by using the telexistence becomes a pilot's avatar since it gives a feeling as if the pilot became the robot. In order for an avatar robot and a person to co-exist in the same space, it is necessary for the safety of walking to avoid a collision and for the robot and the person to walk efficiently. Therefore, we examined how the avatar robot and pedestrian's mutual avoidance movement were performed and how it changed due to the delay of the telexistence system.

Key Words: Omnidirectional mobility, telexistence, Viewpoint tracking

#### 1. はじめに

移動を伴う遠隔体験のリアリティ実現には, 移動に対す る主体感の獲得と、それに伴う一人称視点での空間把握 (空間に対する所有感獲得)が不可欠である. 感覚再現の観 点から遠隔移動体験を位置付けるならば, 障害物への衝突 回避や 能動移動による空間の認識には対象物との距離感 の把握が必須となるが, 両眼立体視ではなくむしろ単眼視 手がかりが支配的となり、すなわち能動運動視による奥行 き知覚再現が最も重要な技術要件となる. 一方で, 能動運 動視における奥行き知覚の観点で歩行運動を解析した研 究がなされていないだけでなく、社会的相互作用(Social Interaction)の文脈から見た歩行アバタが対峙者とどう挙動 するか、という観点からの解析は未だなされていない. 歩 行テレイグジスタンスにおいても同様であり、アバタロボ ットとそれに対峙する対向者との接近挙動は解析されて いない. よって,全方向に追従可能なアバタロボットをも ちい, ロボットが障害物を回避しながら人とすれ違う際の 人とロボットとの挙動の解析を行う.

### 2. 歩行に追従するテレイグジスタンス環境の構築

#### 2.1 全方向移動可能なアバタロボット

ロボットが人と同一空間上に共存するためには、衝突を回避するという安全性の確保に加えて、人同士の歩行者間の関係と同様に[1]ロボットと人が効率的な歩行を可能とする必要がある。そのための基本的な要素として、人の回避挙動に追従・再現することができる全方位に移動可能なロボットが必要とされる。よって、ロボットには人の歩行の最大速度(=1.4 [m/s])と全方向における最大加速度(=0.44G=4.3[m/s²])を達成できることが望ましい。しかしながら、多くのテレプレゼンスロボットは横方向に移動する

ことができないため、全方向に移動可能なアバタロボット (図 1)を開発した。本ロボットの最大速度は 1.3[m/s]、最大加速度は 0.8[m/s²]である。移動機構に全方位車輪を有することから、歩行中に対向者を避けるためのサイドステップなどの並進移動を再現可能である。

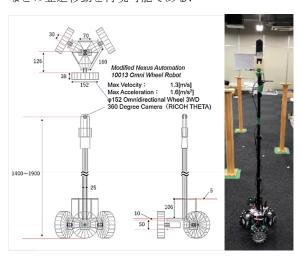


図 1 全方向移動可能なアバタロボットの寸法

#### 2.2 テレイグジスタンスシステム

操縦者は HMD (Vive PRO, 1440 x 1600@90Hz)を装着し、操縦者の目線の高さと等しい位置となるようロボットに設置された全天球カメラ(RICOH THETA S, 1920×1080@30fps)の映像を観測した. HMD の角度に合わせて全天球カメラの映像を切り出すことで、カメラ自体を回転させることなく映像の切り出し範囲を変え、人の頭部の高速な回転によるオプティカルフローを再現した. HMD 装着者の頭部に対してロボットのカメラを水平面内で速度追従させた.本システムにおける動作遅延は 300[ms]であった.

#### 2.3 システム遅延の予測補償

障害物や対向者を回避するためには奥行きの知覚が重要である。奥行きの知覚方法は両眼立体視と運動立体視に大別されるが、本システムでは全天球カメラ1台の映像を使用しているため運動立体視を用いた奥行きの判断を行うこととなる。近藤らによると、遠隔操縦における運動立体視において奥行き知覚が現地にいるのと等価であるとされる許容可能な映像表示の遅延は82[ms]であり[2]、本システムはこれを大きく上回っている。そのため、見かけ上のシステム遅延を減少させるために直近の過去30点(=500[ms])の頭部位置から最小二乗法を用いて3次関数をもとめ、300[ms]先の未来の頭部位置の予測を行った。

#### 3. アバタロボットの静止対象物に対する回避運動 3.1 実験目的

システム遅延が減少するほどアバタロボットの挙動は 人が実際に歩いた際の挙動に近づくと考えられる。そこで、 アバタロボットの正面に 3 本の柱を立てそれを避けるように被験者に歩かせ(図 2)、挙動の比較を行った。図 2 で は操縦者の移動に追従してロボットが移動する様子を示 しており、操縦者はロボットの視点位置の映像を観測する。 3.2 実験条件

比較した条件は、以下の4条件である[4].

<u>TP + no DC</u> テレプレゼンス(TP)を行い遅延補償(DC: Delay compensation)を用いない

**TP+DC** テレプレゼンスを行いかつ遅延補償を用いる

 **DW + HMD** アバタロボットを用いないが全天球カメラを

 手で持ち HMD を被った状態で人が直接歩く

<u>DW + no HMD</u> アバタロボットを用いずに人が単眼で観測 しながら直接歩く

TP + no DC 条件はシステムの動作遅延及び映像の伝送遅延があり各条件の中で最も遅延が大きい条件であり遅延は 500[ms]程度あった. TP + DC 条件はシステムの動作遅延及び映像の伝送遅延はあるものの遅延補償を用いることで遅延を減少させている条件であり遅延は 300[ms]程度あった. DW + HMD 条件は人が全天球カメラを所持した状態で、HMD を通して全天球カメラの映像を観測しながら直接障害物を回避する条件であり、映像の伝送遅延のみが存在し遅延は 100[ms]程度あった. DW + no HMD 条件はHMD を被らずに人が単眼で直接障害物を見ながら回避する条件であり、遅延は 0[ms]であった. 被験者は 1 名で各条件において 7 試行行った.



図 2 静止対象物に対する回避運動の実験の様子

#### 3.3 結果と考察

各試行の移動軌跡に対して, 第 1 障害物(O1)と第 2 障害物(O2)を結ぶ直線状との交点(P1)・第 2 障害物(O2)と 3 つ目の障害物(O3)を結ぶ直線状との交点(P2)が存在する. O1と P1 の距離を R1, O2と P2 の距離を R2とし, それぞれを O1・O2 までの最接近距離とみなす. 各条件における R1・R2 の結果を図 3 に示す. R が少ないほど障害物の近くを通り過ぎようとしたことを示す.

DW+no HMD 条件を除く R1 の平均はほぼ等しい. DW+no HMD 条件だけが R1 の値が大きくなったのは HMD をつけていないことによって視野が広くなり O1 と O2 を同時に観測することができたために障害物の中央を抜ける戦略をとったと考えられる. 一方, そのほかの条件ではHMD によって視野が制限されたために O1 のみを観測しながら回避を行った可能性が高い.

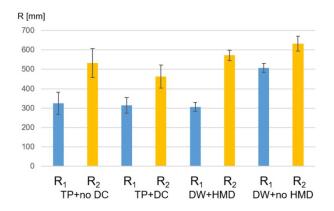


図3 障害物からの回避距離[4] (R1: 第1障害物からの最接近距離, R2: 第2障害物からの最接近距離)

他の条件に比して視野の広い DW + no HMD 条件を除いて考察を行う。R1・R2の分散の大きさは、TP + no DC 条件(遅延約 500[ms]) > TP + DC 条件(遅延約 300[ms]) > DW + HMD 条件(遅延約 100[ms])となっている。第1障害物までの最接近距離は、3条件間で分散や平均に何れも顕著な差が認められない一方で、第2障害物までの最接近距離は前述のシステム遅延の大きいほど、最接近距離における移動軌跡の分散が大きいといえる。分散量が遅延時間に従属であることから、遅延による外乱が、視覚的歩行誘導手法である Redirected Walking における誘導の可知閾よりも上回る範囲であったと考えられる[5]。

当該3条件は全天球カメラ映像という単眼視手掛かりに 基づいて行われていることから、遅延が大きい視覚体験環境においても単眼手掛かりに基づく能動運動視に頼りながらも、裸眼同等の能動運動視を行って障害物回避行動を達成するシステムを構築できたといえる。障害物を回避できており、裸眼条件と同等の運動を歩行者が行っているということは、現前の視覚空間に対して自己と相互作用をもたらす所有感を伴った空間把握が行われたと解釈できる。

#### 4. 歩行者とアバタロボットとの相互回避運動.

#### 4.1 実験条件

3章においてアバタロボット単体の回避運動について述べた.本章においては実際にアバタロボットと対向者がたがいに見えている状態でどのように回避を行うのかを調べる.遅延が増大するほどアバタロボットの回避行動が遅れることにより、対向者がより大きく回避行動をとると考えられる.そこで、3章の実験と同様に柱を2つ立て、最後の柱があった場所ですれ違う場所とした.アバタロボットは2つの柱を回避したのちに対向者とすれ違う.一方、対向者はアバタロボットをすれ違ったのちに2つの柱を回避する(図4).

比較した条件は TP+no DC 条件, TP+DC 条件, DW+no HMD 条件に加え, 対向者の挙動に対してアバタロボットが全く反応しないという条件 no TP: Replay Run 条件を追加した. no TP: Replay Run 条件では, テレイグジスタンスを行わずに DW+no HMD 条件で操縦者の移動軌跡を記録したものをロボット側で再生した. そのため, 対向者の動きに反応してロボットが挙動を変化させることはない. なお, 対向者には再生された軌道かどうか判断できないように, どの条件でも操縦者はロボットが自身の動きに追従するかどうかにかかわらず歩行を行った. 被験者は操縦者1名, 対向者1名で各条件において7試行ずつ行った.



図4 歩行者とアバタロボットとの相互回避運動の様子 (操縦者の移動に追従してロボットが移動する.操縦者はロボットの視点位置の映像を観測する.歩行者はロボットの進行方向と対向し、柱を回避して進んでくるロボットとすれ違いロボットの初期地点へと向かう.)

#### 4.2 結果と考察

ロボットと対向者間の距離が最も小さくなる時刻における2者間の距離をすれ違い距離(PD: Passing Distances)とする. 各条件におけるPDを図5に表す. PDが大きいほど対向者はより危険を感じており距離を置こうとしたことを示すと考えられる.

no TP: Replay Run 条件において PD の平均値が最も大きい.これは、対向者であるアバタロボットが歩行者自身の運動との相互作用を持たないことを歩行者が明確に検出しており、その結果で歩行者の回避方策が切り替わりうることを明白に示している.いわばアバタロボットと歩行という文脈で社会的相互作用を持てない場合、アバタロボッ

ト対し感じられるはずのリアリティを損なったために、より遠方を通るように回避するという方策が採用されたと考えられる.

TP+no DC 条件, TP+DC 条件, DW+no HMD 条件の3条件においてはPD の平均値に顕著な差が認められなかった.これはいずれの3条件でも歩行における社会的相互作用がある条件とみなすことができるだけでなく,裸眼と同程度の回避行動を対峙者間でとっていることから,静止障害物だけでなく,歩行者と相互作用をもつ能動運動視条件下においても,操縦者が提案手法を用いて空間把握を成立させていることが明らかとなった.

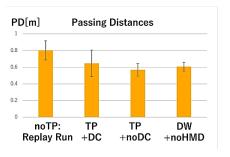


図 5 歩行者とアバタロボットとのすれ違い距離

#### 5. おわりに

アバタロボットと歩行者を用いた対峙者間の回避運動 実験により、能動運動視に基づく回避運動解析の結果、全 方位移動機構を有するアバタロボットを用いた単眼能動 運動視によって、裸眼と同程度の回避行動が実現できるこ とから、アバタロボットによる能動運動視における空間把 握を実現した. さらに、アバタロボットが歩行者と社会的 相互作用を持たない場合、歩行者はより遠方に回避する行 動を示したことから、アバタロボットの運動観察から歩行 者は自身の歩行運動と相互作用を持つか否かを明白に検 出できていることが明らかとなった.

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 挑戦的萌芽研究 16K12478, 基盤研究(A) 19H01121 の助成を受けたものです.

#### 参考文献

- R. Sommer: Personal Space -The Behavior Basis of Design-. Englewood Cliffs, 1969.
- [2] 近藤 大祐,他:遠隔操作のための運動立体視システムにおける表示遅れの影響の研究,ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2015, "2P1-P06(1)"-"2P1-P06(4)", 2015.
- [3] Rick Lehrbaum InfoWeek, "Attack of the Telepresence Robots", "InfoWeek", 01.11.13 (accessed Dec. 8, 2013)
- [4] Taro Maeda, Masataka Kurokawa, Hiroki Miyamoto, Where are you walking? : Reality of telepresence under walking, IEEE Virtual Reality Conference, 2019
- [5] Steinicke, F., et al. Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques, TVCG '10 on, 16(1): pp. 17– 27, 2010.

### 日本バーチャルリアリティ学会研究報告 VR 学研報 Vol.24, No. TX01

第 14 回テレイグジスタンス研究会

©2019 by the Virtual Reality Society of Japan (VRSJ)

日本バーチャルリアリティ学会 発行者

〒162-0801 東京都新宿区山吹町 358-5 アカデミーセンター

TEL 03-6824-9376/FAX 03-5227-8631

e-mail office@vrsj.org

The Virtual Reality Society of Japan Academy Center, 358-5, Yamabuki-cho, Shinjuku-ku Tokyo, 162-0801 Japan

禁無断転写·転載