

令和 元年 6 月 21 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12478

研究課題名(和文)トロコイド移動機構を用いたテレプレゼンスロボットの開発と検証

研究課題名(英文) Development and verification of a telepresence robot using a trochoid movement mechanism

研究代表者

前田 太郎 (MAEDA, TARO)

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：00260521

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は「地を蹴って進むすべての物の上限となる加速性能を通常車輪によって実現する全方位移動制御則の実現」によって「自身の挙動と変わらない応答性能をテレプレゼンス系に付与する」試みである。トロコイド曲線軌道を用いたホロノミックな全方位移動が可能な車輪走行機構を提案し、車輪制御型一般の走行系においてホロノミックな全方位可制御性を最大化する走行手順を定式化することに成功した。また実寸大のアバターロボットを実環境での歩行に追従させたテレプレゼンス歩行による臨場感の再現実験を行い、「テレプレゼンスでの歩行すれ違い」動作と対向者の応答結果を計測・評価し、実歩行と同様の臨場感の再現を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高度に普及した通信環境を利用して遠隔地の実空間において自身の代理を勤めるテレプレゼンスロボットは現実的な選択肢となりつつある。しかし現行のテレプレゼンスロボットでは臨場感をもった移動体験を再現出来ていない。この主たる要因は視点・聴点の実時間追従性の欠如にある。ロボットの移動機構においてヒトと同等の動きを可能にするような脚機構ロボットはコストや可制御性の面で実用的でなく、低コストな車輪機構では特殊車輪が必要で接地性や段差に対する走破性には問題があった。本提案の機構は通常車輪を用いて全方位へのホロノミックな高加速度の移動性を実現することでこの問題を解決し、臨場感のあるテレプレゼンス環境を実現する。

研究成果の概要(英文)：This study is an attempt to give the telepresence system a response performance that is not different from its own behavior, by realizing the omnidirectional movement control law that realizes the acceleration performance that is the upper limit of all objects that kick the ground is there. We proposed a wheel traveling mechanism capable of holonomic omnidirectional movement using a trochoidal curvilinear trajectory, and succeeded in formulating a traveling procedure that maximizes holonomic omnidirectional controllability in a wheel-controlled general traveling system. We also experimented on the reproduction of the presence by telepresence walking in which the full-sized avatar robot was made to follow the walking in the real environment, and measured and evaluated the "walking passing by telepresence" motion and the response results of the other person. The reproduction of the same sense of presence as walking was confirmed.

研究分野：人間情報工学

キーワード：全方位移動 テレプレゼンス 歩行 臨場感の再現 アバターロボット 加速度限界設計 ホロノミック 車輪走行

## 1. 研究開始当初の背景

高度に普及した通信環境を活用して自宅に居ながらにして仕事をする人々にとって遠隔地の実空間において代理を勤めるテレプレゼンスロボットの存在は現実的な選択肢となりつつある。しかし現行の車輪走行系によるテレプレゼンスロボットは現地の臨場感をもった空間情報の伝送という観点においては極めて不満の残る段階に留まっている。その主たる要因が視点・聴点の実時間追従性の欠如にあるが、ヒトの頭部位置姿勢への空間6自由度追従を実現する機構コストの高さがその実装を妨げてきた。近年画像処理によって全方位映像から任意視線方向映像を再構築することが容易となったために、残る問題は視点の3次元並進追従の低コスト化の問題となっている。移動機構においてこの全方位へのホロミックな移動を実現しようとした場合、ヒトと同相の動きを可能にするような汎用性を満たす脚機構ロボットの制御はコストや可制御性の面で実用的でない。しかし低コストで走行可能な車輪機構では球体やオムニホイール等の特殊車輪による走行系の提案が主体であり、接地性・段差対応能力の低さのために実用的な環境での走破性には問題があった。本研究で提案されるトロコイド走行系は大口径の通常車輪を用いた完全ホロミックな全方位移動が可能な走行系であり、これまでに研究代表者は電子制御を用いないシンプルな機械機構のみによって高い走破性を実現することに成功している[1]。

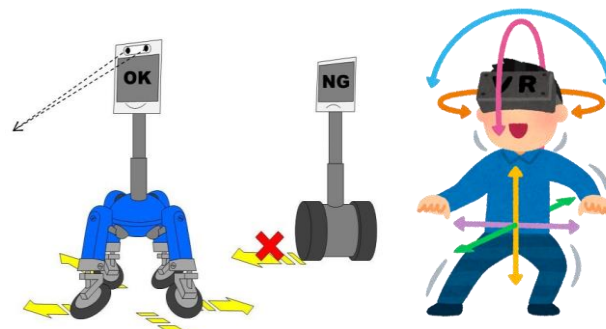


図1 テレプレゼンス状況下における全方位移動能力への要求

2. 研究の目的

一般にヒトの臨場感を支える空間知覚には両眼視による奥行き知覚が用いられると考えられているが、これは室内条件（対象距離 $<4[m]$ ）での視覚手がかりに関する判断である。テレプレゼンスロボットのような走行移動を伴う場合、これを越える対象距離を必要とすることが多く、同条件下での空間知覚には運動視差が支配的となる。この場合、観察者の能動的視点移動に対するロボットの追従応答再現性が臨場感の決定要因となるため、テレプレゼンスに用いる平面走行系においては全方位への視点移動を継続的に追従可能なホロミック性の高い並進速度制御が求められる。この観点から本研究提案ではトロコイド曲線軌道を用いたホロミックな全方位移動が可能な車輪走行機構を提案・試作し、テレプレゼンスロボットによる3次元環境情報の取得性能と対応挙動性の向上を狙った。試作機によるテレプレゼンス実験によって以下の2つの開発目標を達成することを狙うこととして研究を開始した。

## 2. 研究の目的

1) ホロミックな全方位移動の特徴を活かして実時間での3次元視点追従を実現し、正確な運動視差情報の再現によってテレプレゼンスでの3次元的な環境把握能力の向上を実現する。

2) 同機構の全方位にホロミックな移動が可能である特徴を用いた2次元倒立振り子制御と多点接地駆動による疑似脚機構の組み合わせによって高重心で小占有床面積のテレプレゼンスロボットを試作し、頭部対応挙動性の向上によるテレプレゼンス臨場感の向上を検証する

3. 研究の方法

しかし交付段階においてリンク機械系の試作に必要な部品加工費相当額に届かない減額支給となったため、等身大の頭部追従を可能とするトロコイド走行系の実試験機を新規に試作することは困難となった。そこで、テレプレゼンス課題として不整地踏破性を含めた6自由度視点追従での環境対応性への検討は断念し、平坦面環境における全方位追従性のみに特化した5自由度視点追従テレプレゼンス環境下での歩行体験再現性についての検討に限定することで、機械リンク式の試作機のコストを低減することで以下の手順で研究を進めた。

## 3. 研究の方法

① トロコイド走行系による追従特性の改善に関しては、歩行追従に求められる限界条件についてより詳細かつ精密に検討・考察を行うことで補うこととし、これを全方位追従実験における検証条件の設計パラメータとして用いることによって間接的な検証を行った。

② 設計された制御方式の実制御可能性の検証については、試作コスト削減のために機械制御方式を廃し、対不整地性を度外視した数値制御型の電子制御型の小型試作機を用いた検証実験を行った。これに伴い車輪制御型の走行系において**ホロミック全方位可制御性を最大化する走行手順を設計し、これを一般化パラメータにおいて定式化することに成功した。**

③ 実寸大のテレプレゼンスアバターロボットを用いた実環境走行によるテレプレゼンス臨場感応答の検証実験については段差走破性の問題を回避可能な平坦面内での歩行に限定することで、追従性能を改良させたオムニホイール形走行系による全方位追従型テレプレゼンス実験系を構築し、同システムを介した**高い臨場感を保持した歩行体験の再現とその環境下での「テレプレゼンスでの歩行すれ違い」動作と対向者の応答結果を計測・評価した。**

- ① トロコイド走行系による追従特性の改善に関しては、歩行追従に求められる限界条件についてより詳細かつ精密に検討・考察を行うことで補うこととし、これを全方位追従実験における検証条件の設計パラメータとして用いることによって間接的な検証を行った。
- ② 設計された制御方式の実制御可能性の検証については、試作コスト削減のために機械制御方式を廃し、対不整地性を度外視した数値制御型の電子制御型の小型試作機を用いた検証実験を行った。これに伴い車輪制御型の走行系において**ホロミック全方位可制御性を最大化する走行手順を設計し、これを一般化パラメータにおいて定式化することに成功した。**
- ③ 実寸大のテレプレゼンスアバターロボットを用いた実環境走行によるテレプレゼンス臨場感応答の検証実験については段差走破性の問題を回避可能な平坦面内での歩行に限定することで、追従性能を改良させたオムニホイール形走行系による全方位追従型テレプレゼンス実験系を構築し、同システムを介した**高い臨場感を保持した歩行体験の再現とその環境下での「テレプレゼンスでの歩行すれ違い」動作と対向者の応答結果を計測・評価した。**

この方針変更によって、試作機製作を変更したことによってトロコイド走行系の実機構成による段差克服等の検証は断念せざるを得なくなったが、テレプレゼンスにおける全方位移動の再現とその効果については十分な検証を進めることができた。

#### 4. 研究成果

テレプレゼンスロボットの頭部運動に課せられた課題は「操縦者自身の頭部運動への完全な実時間追従」である。これを実現するために同ロボットにおいてはヒトと同等の高位置にある視点をヒトと同様の速度で運動させる性能が求められる。これを省床面積で実現するための選択肢として現行のロボットで普及しているのが倒立振り子型走行系であるが、二脚立脚によって体幹を制御することで頭部を操作するヒト挙動に対して追従性能の不足、特に速度ゼロ領域付近でのホロノミックな全方位加速度を要する局面において追従に失敗することが多く、歩行体験の没入的リアリティを維持することが困難であった。このため本研究では**ホロノミックな全方位加速度性能を常に最大限に保持した移動が可能な車輪走行系を設計**し、これを用いたテレプレゼンスロボット機構を提案する。この機構で本研究が狙うのは「視点追従性の向上による空間性の環境認識における運動視差の再現効果の検証」である。

従来、3次元的な空間認識手がかりとしては両眼視差が用いられてきたが、安定した固視点をとれない移動中の観測者にとってはむしろ頭部挙動に対応したオプティカルフローによる運動視差情報の再現性が重要である。このため、頭部挙動の追従性能として並進1G程度の加速度性能を達成目標に掲げる。この挙動要求は脚・車輪などの機構を問わず、接地摩擦力によるせん断方向トルクによって平面内移動をする機構にとってその限界値にかなり近い要求である。この要求を満たすべく本研究では車輪走行系を用いた全方位移動における加速度制御の限界設計に取り組み、速度ゼロ状態から最大並進速度までの期間に常に上記の原理的な最大加速度でのホロノミックな全方位制御を可能にする制御シーケンスを設計・検討する。

そもそも自動車などの通常の並進型のステアリング機構を持つ車輪走行系が全方位のホロノミック性を維持し得ないのは車輪軌道の曲率半径が車輪半径を下回れないという速度ベクトルの方向変化の限界と、低速時には車輪推進の線速度を同様に低減させるしかないという速度ベクトルの大きさ方向の限界の組み合わせによるものである。まずこの限界値について考察する。先述のように接地走行系にとって最大静止摩擦係数 $\mu$ と重力加速度 $g$ の積 $\mu g$ は接地駆動力による能動移動加速度の上限値でありこれは固定値である。したがって走行系における制御余裕とは常に任意方向に加速度をこの上限値まで出し得るか否かによって設計されるものである。

車輪走行系において車輪の接線方向の加速度制御は車輪軸角加速度によって実現されるため、十分な車輪の駆動力制御があればこの上限までの任意の値を常時設定可能である。一方、車輪走行軌道の法線方向への加速度制御はステアリング操作によって実現されている。車輪半径 $r$ 車輪軸角速度 $\omega$ の時、ステアリング時にキャンバー角最大で曲がり得る曲率半径は車輪半径 $r$ に等しい。この際に走行軌跡の側方に出し得る最大加速度はこの曲率半径を辿る際の向心加速度 $r\omega^2$ になる。制御余裕としてはこれを最大化したい。一方で最大静止摩擦係数 $\mu$ と重力加速度 $g$ の積 $\mu g$ は接地走行系にとっての並進加速度の上限値でありこれは固定値である。側方加速度にこの上限値までを割り振る制御を考えると、 $\mu g = r\omega^2$ より、限界車輪速度 $v_L = \sqrt{r\mu g}$ を定義することが出来る。すなわちこれは走行中において車輪線速度 $v = r\omega$ が $v_L$ を下回る場合にはステアリングによって法線方向に加速度上限を割り振ることが出来なくなるということになる。これは例えば直径80cmの車輪で1.8[m/s]時速6.4[km/s]に相当する。トロコイド走行系がホロノミックな全方位走行能力を持つ理由は、車輪速度と車体速度を独立に設定可能なことによって車体速度ゼロ付近においても車輪速度を常にこの下限値以上に保持することが可能であることによるものである。接地点の主軸周りの回転速度を決定する主軸角速度と主軸半

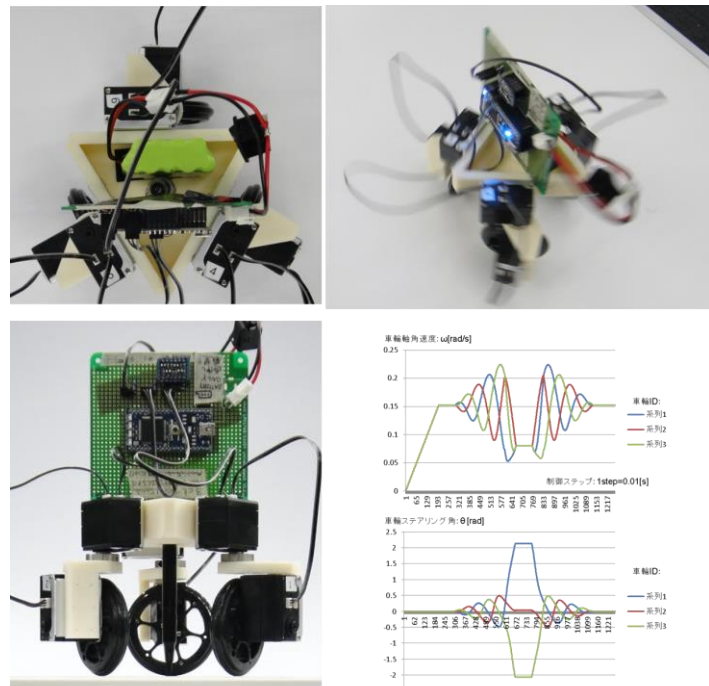
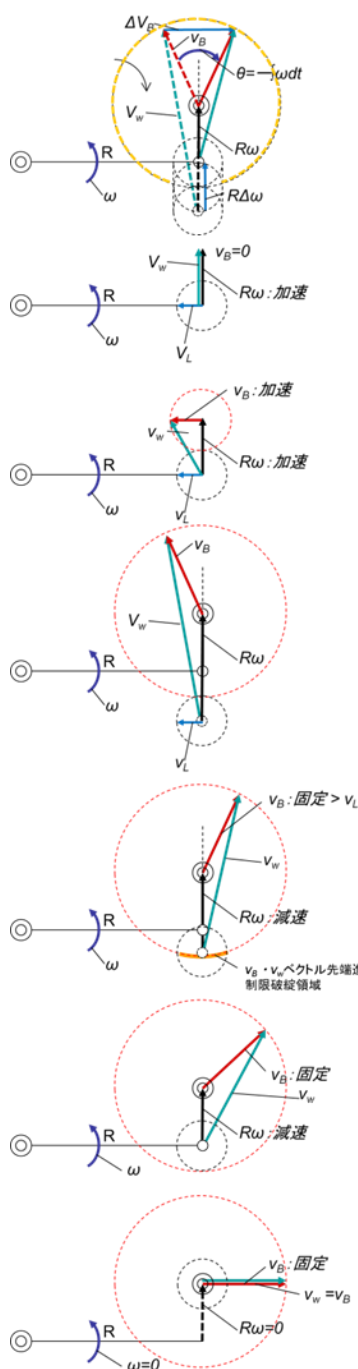


図2 数値制御型試作機[4]: 簡略化に徹しキャンバー角制御を省略した3輪構成( $r=0.03[m]$ ). 車輪軸の角速度上限不足( $0.21[m/s]$ )で車輪速度が $V_L=0.54[m/s]$ に未到達ながら、モード遷移動作シーケンスの実証確認に運用。車体速度を変化させずにモード間遷移を実現。同図右下では図3のシーケンスによって「静止→トロコイド走行による増速→等速並進走行→トロコイド走行による減速→静止」までの行程のサーボ指令値を示した。

径の積を  $v_L$  以上に維持することによってこの条件をクリアすることができる。

以上、同問題設定において「摩擦駆動型の車輪走行系一般における全方位移動性能の上限値」を解析的に定義し、これを実現するための「車輪転がりの下限速度」=  $v_L$  を求めることができた。これは「トーラス型車輪とステアリングを用いる車輪走行系一般において適用可能な制御限界」であり、車輪半径と接地摩擦係数を用いて一意に決定されるものである[4]。

この走行条件を検証・利用する最初の試作機の設計として、ヒトサイズの機械リンク式のステアリング構成から、1/5スケールの小型電子制御式の数値制御に置き換えることで試作の低コスト化を行った。電子制御によるAWD（全輪駆動）かつAWS（全輪ステアリング制御）による即時の走行モード変更によってこの限界性能を常時最大化する制御の可否を検証した（図2参照）。この検証機を用いて図3のように速度下限値以上での並進モードとこれを下回る際に車輪速度を維持するトロコイド走行モードを往復するモード変更中も含んだ「ホロノミックな全方位加速度制御の上限値」を常時保持する制御解の存在とその解法を導くことに成功し、変換スケール条件下での速度域ではあるものの、その制御を実現することに成功している[4]。



左図はトロコイド走行系における主回転軸を法線とした主回転腕座標上での上面図である。主軸角速度 $\omega$ によって半径 $R$ で旋回する接地車輪の車輪速度 $v_W$ は車体並進速度 $v_B$ と車輪回転速度 $R\omega$ の和として決定される。各時刻の $v_W$ の変化は $v_B$ の向きが $-\omega$ の角速度で回転することによって決定される。この系において $v_B < R\omega$ であるモード3と $v_B > R\omega$ であるモード2、 $\omega=0$ で並進するモード1の間を遷移して加減速を行うプロセスを考察する。

**Step1:** 完全静止状態からはモード3で $v_B=0$ のまま、車輪速度 $v_W$ が限界速度 $v_L$ を越える条件、 $v_W > v_L$ となるまで $\omega$ を加速。本ステップでは常に $v_W=R\omega$ 。同条件まで $\omega$ 加速終了後は全方位の限界加速度 $\mu g$ を実現するホロノミック性を担保した走行状態となる。

**Step2:**  $v_W > v_L$ の条件を満たしながら、 $v_B < v_W=2\pi R\omega$ の間モード3で $v_B$ を加速。図中では $v_B$ の加速分だけ $R\omega$ も加速することでモード3での限界制御成立条件である $R\omega > v_B+v_L$ を維持する。

**Step3:**  $R\omega > v_B+v_L$ かつ $v_B > v_L$ の状態にまで主回転軸と車体を加速後、 $v_B$ を固定して $R\omega < v_B-v_L$ となるモード2へ移行を開始。以降、同遷移条件を満たすために $\omega$ の減速によって $R\omega$ を $2v_L$ 以上一気に減速することでモード間遷移を行うプロセスに入る。左図状態から $v_B$ を固定したまま $\omega$ を減速し始めると半径 $v_B$ の赤大円と半径 $v_L$ の黒小円が交差した「制限破綻領域」が生じる。

**Step4:** この過程では $v_W > v_L$ を満たしながら二つのモードの「曲率半径最小状態」を死点として回避しつつ一気に移行する必要がある。このためには赤大円と黒小円の交差領域（橙色表示）内に回転している車輪速度 $v_W$ と車体速度 $v_B$ の先端が侵入しないようにする必要がある。従ってこの期間は回転位相において一周を超えることはできない。

**Step5:**  $R\omega < v_B-v_L$ となるモード2への移行を完了。ここまでのStep4区間において生じていた「制限破綻領域」を跨いでいないこと、この間 $v_W$ によって辿る軌跡が最小曲率半径 $r$ （=車輪半径）を下回っていない軌跡を決定する（※次章参照）。この後モード2で $v_B$ を固定しつつ $\omega$ を減速する。

**Step6:**  $\omega=0$ にてモード1に移行。 $v_B=v_W$ となり、通常の意味での車輪並進系として走行する状態となる。以降 $v_B > v_L$ を維持する限り、接地摩擦駆動走行系としての限界加減速走行が可能となる。また、減速時にはこの逆のプロセスを辿ることになる。

図3 静止状態からトロコイド軌跡を経て高速並進状態まで遷移する間、常に限界並進加速度での全方位制御を可能とするモード間遷移過程[4]。図2右下の過程では本図での step1→6→1の過程を連続に往復している。

この制御則は重心周りに車輪接地点を制御可能な車輪走行系、例えば多自由度脚の先端に車輪を搭載するような構成の多脚ロボットのような走行系全般に適用可能な制御則であり、接地摩擦力で駆動されるホロミックな全方向移動の上限値を維持しながら静止から最大並進速度までを連続に遷移できる一般解の一つとして利用可能な成果である。

本研究では全方位にホロミックな移動を可能にする走行系を歩行時のテレプレゼンスに適用することで没入感を伴った遠隔での歩行体験の実現を目的としている。本研究での最終課題として上記制御則を利用したホロミックな全方向移動を可能にするアバターロボットを構築し(図4左上)、実際の歩行動作に同期した視点移動を実現するレイグジスタンス実験環境を用いた評価実験を行った。同アバターロボットは、対比すべき既存のテレプレゼンスアバターロボットが通常は2~3輪のステアリング走行ロボットであるため、歩行の臨場感にあまりにも乏しく対比的な議論の意味を失いかねないために、新たな比較用に試作する予定であった全方向移動ロボット台車を改造したものである。車体の軽量化のためにフレームを新造し、モーター電源電圧とオムニホイールの車輪径を1.5倍に拡張したことによって歩行加速度上限の5~7割程度の全方位追従性を実現させることに成功している[3]。この走行系を用いた予備実験において「オムニホイール軌道追従」条件と「トロコイド軌道追従」条件についても比較検討を行い、段差耐性の問題を度外視する限りにおいて、同等の追従を実現することに成功している[]。同アバターロボットにおいて実際の歩行動作を用いた遠隔歩行実験を行い、対向者とのすれ違い状況を再現した(図4左下)。この状況において、視覚伝送遅れと制御遅れによる応答の時間遅れがもたらすリアリティの低下=挙動の「ヒトらしさ」の低下と、それに伴うすれ違い動作の関係を解析した結果、対向歩行者とアバターロボットの間にも相手の対応に応じた社会性が反映された応答として「すれ違い距離=最接近距離」が対人歩行と同様に再現されることが証明され、「現地を歩いていた」とする遠隔歩行者の臨場感だけでなく、「アバターロボットのオペレータが遠隔存在としてそこに存在し歩行移動している」という存在感を対歩行者に与え、遠隔存在として社会的なインタラクションを構築していることを確認することができた[2]。

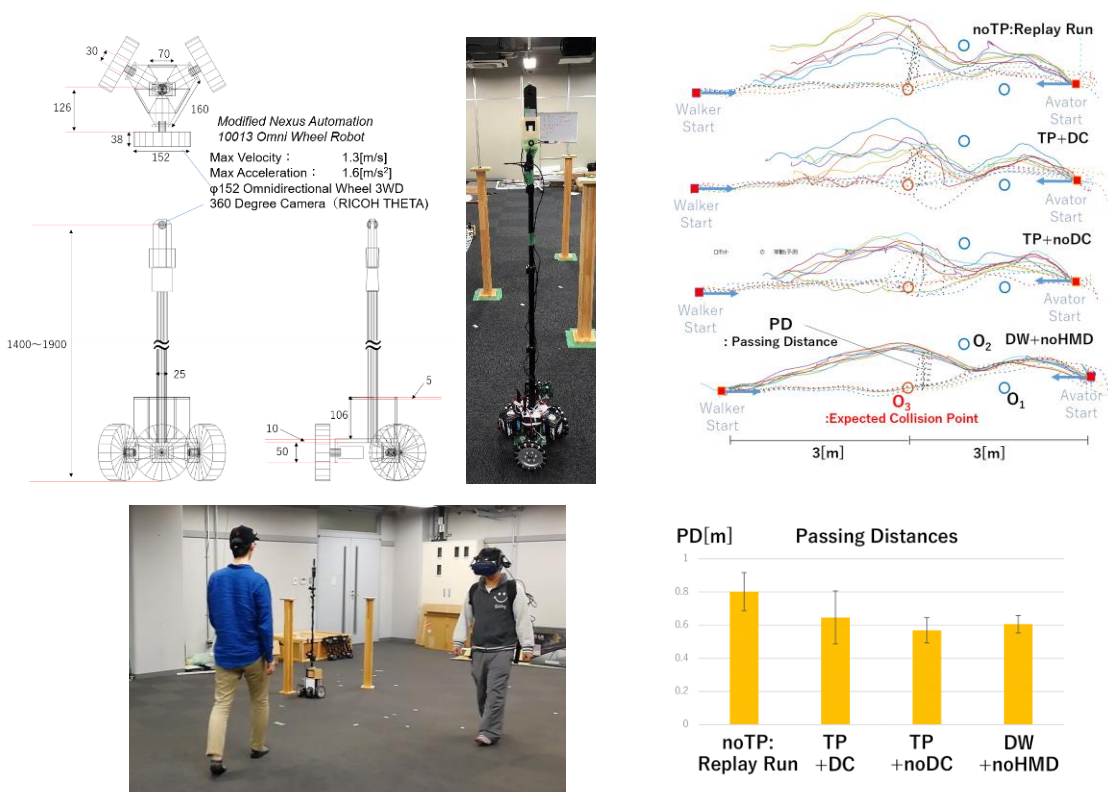


図4 高臨場感を保持したテレプレゼンス歩行体験の再現とその環境下での歩行すれ違い動作の検証。左上:追従性を向上させた試作アバターロボット[3]。左下:テレプレゼンス環境下でのすれ違い歩行実験。右上:同実験結果。黒点線で対向歩行者とアバターロボットのすれ違い地点を結んでいる。右下:すれ違い距離の平均と分散。対向者はそれとは意識しないままに「ヒトがテレプレゼンスしているアバターロボット」に対してのみ通常の対人行動を再現している[2]。

本提案では摩擦駆動型の車輪走行系全般に適用可能な制御則として、ホロミック全方向加速度制御の上限値を常時保持する制御解の存在とその解法を導くことに成功し、同制御則を用いたホロミック走行系によって、テレプレゼンス環境において高い視点追従性を持ったアバターロボットを実現し、これを介した高い臨場感を持って没入的なリアリティを保持した歩行体験の再現に成功した。同環境では遠隔存在としてのアバターロボットは自然な対人的社会性を持って周囲環境に適応可能であることが確認された。

本研究の成果はやや大げさに言えば「地を蹴って進むすべての物の上限となる走行性能を通常車輪によって実現する全方位移動制御則の実現」によって「自身の挙動と変わらない応答性能をテレプレゼンス系に付与する」試みに一定の成功をもたらしたということになる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1 件）

[1] **Taro MAEDA** and Hideyuki ANDO: Omni-directional mobility running through trochoidal trajectory, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.31 No.4, 2019（査読あり）

〔学会発表〕（計 3 件）

[2] **Taro Maeda**, Masataka Kurokawa, Hiroki Miyamoto: Where are you walking? Reality of telepresence under walking, IEEE VR 2019（査読あり）

[3] **前田太郎**, 黒川正崇, 山岡悠: トロコイド走行によるテレプレゼンスロボットの視点移動の検証—オムニホイールを用いない全方位移動機構 第 8 報, ROBOMECH2018, 2018（査読なし）

[4] **前田太郎**: 数値制御による走行モードの自在性を優先したトロコイド走行系—オムニホイールを用いない全方位移動機構 第 7 報—, 2A1-E07, ROBOMECH2017, 2017（査読なし）

〔その他〕

[https://www.youtube.com/watch?v=1qCa\\_Zc0kkY](https://www.youtube.com/watch?v=1qCa_Zc0kkY)

[https://www.youtube.com/watch?v=eeLAo1W\\_j\\_E](https://www.youtube.com/watch?v=eeLAo1W_j_E)

<https://www.youtube.com/watch?v=tkD5I5so8LY>

<https://www.youtube.com/watch?v=HEYcB3CV65g>

<https://www.youtube.com/watch?v=iiFuo3dXZ5g>

<https://www.youtube.com/watch?v=Cwi15AtltiA>

<https://www.youtube.com/watch?reload=9&v=vBDTvnqvsak>

## 6. 研究組織

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：安藤英由樹, 黒川正崇, 宮本拓, 山岡悠

ローマ字氏名：Hideyuki ANDO, Masataka Kurokawa, Hiroki Miyamoto, Yu Yamaoka

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。