

令和元年6月5日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H05866

研究課題名(和文)視触覚リダイレクションによる空間知覚の操作とVR空間の拡張

研究課題名(英文)Visuo-haptic Redirected Walking for Spatial Perception Manipulation and Extension of Virtual Space

研究代表者

鳴海 拓志(NARUMI, Takuji)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師

研究者番号：70614353

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、空間知覚をユーザに悟られることなく操作することで、狭い実空間を歩き回っているにもかかわらず広大なVR空間での移動を体験可能にするRedirected Walking(RDW)技術に触覚刺激を導入した新手法「視触覚RDW」を実現し、効率的なRDWを可能にすることである。本研究では(1)曲率操作・回転量操作・勾配操作・昇降感覚提示を実現する視触覚提示条件の明確化、(2)最適な触覚刺激提示手法の構築、(3)視触覚RDW手法の効果検証に取り組み、それぞれに有効な手法を提案した。特に曲率操作に関しては従来の50分の1のスペースでの無限歩行を可能にし、その有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

バーチャルリアリティ(VR)研究では初期より高い没入感や臨場感、操作感を与えるためにVR世界に身体性を取り入れることが重要視され、実空間を動き回るユーザの身体動作を計測してVR空間内を動き回れるようにする手法が模索されてきた。しかし、ユーザが実世界を歩く時、同じ動きをVR空間に反映すると、実空間より大きいVR空間を歩き回ることができない。VR空間は無限でも、歩いて探索できる範囲は実世界の制約を受ける。本研究は、人の空間知覚の仕組みを考慮することで、上述した空間的制約を解決する新たな手法を提案し、その有効性を確認するもので、歩行型のVRの教育や産業、一般用途での応用を推し進める意義を持つ。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to realize "Visuo-haptic Redirected Walking (RDW)" which enables us to experience large virtual spaces on foot within a limited physical space by using the cross-modal effect between vision and haptics on spatial perception. In this research, (1) We clarified the conditions of visual and haptic presentations to realize effective redirected walking techniques with curvature manipulation, rotational manipulation, inclination operation, and up and down sensation presentation. Then (2) we constructed an optimal haptic presentation method. (3) We verified the effectiveness of the visuo-haptic RDW methods via several experiments. In particular, we confirmed that the curvature manipulation technique based on visuo-haptic RDW enabled infinite walk in virtual spaces within one-fiftieth of the real space required by the conventional method.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：Redirected Walking 視触覚間相互作用 空間知覚 バーチャルリアリティ クロスモーダル

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

バーチャルリアリティ(VR)研究では初期より高い没入感や臨場感、操作感を与えるためにVR世界に身体性を取り入れることが重要視され、実空間を動き回るユーザの身体動作を計測してVR空間内を動き回れるようにする手法が模索されてきた。しかし、ユーザが実世界を歩く時、同じ動きをVR空間に反映すると、実空間より大きいVR空間を歩き回れることはできない。VR空間は無限でも、歩いて探索できる範囲は実世界の制約を受ける。

この問題に対し、トレッドミル機構等によりその場で無限に動けるようにして移動量を計測し、それをVR世界での移動に反映するロコモーションインタフェースが提案されている。しかし、移動方法にさまざまな制約があるものが多く、また移動量をキャンセルするための力が人間に働きかけるため、インタフェースを意識させない自然な歩行をさせることは難しい。

他方、別の解決策として、Redirected Walking(RDW)が提案された。実世界で頭を50度回転させた時にHMD上では頭を80度回転させた時のVR空間を見せるといったように、実際のユーザの身体動作とVR世界における仮想身体の動作の間に気づかれない範囲のずれを作り出した映像を提示して空間知覚を操作し、狭い実空間を歩き回っているにもかかわらず広大なVR空間での移動を体験可能にする技術である。しかし、既存手法では空間知覚操作の効果が十分ではない。特に無限にまっすぐ歩き続けられるVR環境の構築は難しく、既存手法では45m四方以上の部屋を必要とする等、現実的利用は難しい。

これに対し、本研究では触覚刺激を与えることで空間知覚をより強く操作し、RDWの効果を強める手法を提案する。申請者らは、視触覚相互作用を利用することで触覚・体性感覚を操作できることを示し、シンプルな触覚提示デバイスから複雑な形状を提示できる手法を開発してきた。この研究の途上で、人間スケールのオブジェクトから感じられる触覚・体性感覚を操作すると人間の空間知覚が操作できることを発見した。既に予備検討をおこない、曲率半径2mの壁を触りながらVR空間中の直線の壁に沿って歩かせると、直線の壁が存在するという確信が強まり、壁を触らせない場合よりも被験者に直線を歩いているように感じさせることができた。本研究では本発見を精緻化し、触覚提示がRDWの性能をどの程度向上させるかを明らかにし、視触覚RDWの体系化・一般化を図る。

2. 研究の目的

本研究の目的は、空間知覚をユーザに悟られることなく操作することで、狭い実空間を歩き回っているにもかかわらず広大なVR空間での移動を体験可能にするRedirected Walking(RDW)技術に触覚刺激を導入した新手法「視触覚RDW」を実現し、従来の10分の1以下のスペース(5m四方程度)でRDWを可能にすることである。現在のRDW手法は頭部運動と連動した視覚操作のみが行なわれてきたが、申請者らが実現してきた視触覚相互作用による体性感覚操作手法を応用することで、より強力に空間知覚を操作可能にし、既存手法では不可能な狭い空間で「直進し続ける」RDW手法を実現する。そのために(1)空間知覚の効果的な操作に必要な視触覚提示条件の明確化、(2)視触覚RDWのための触覚刺激提示デバイスの構築、(3)視触覚RDW手法の効果検証に取り組む。

3. 研究の方法

壁や手すり、ロープ等に触っているような触力覚を提示することで視触覚相互作用により空間知覚操作の効果を高め、従来の10分の1以下のスペースでRDWを実現する視触覚RDW技術(図1)を実現する。そのために、(1)直進・旋回・坂を登る等の空間要素に関わる空間知覚を効果的に操作するために必要な視触覚情報を明らかにし、これをもとに(2)視触覚RDWを実現する触覚刺激提示デバイスを構築する。その上で、(3)検証実験や博物館展示での活用を通じて、視触覚RDW手法の知覚操作限界・有効性を明らかにする。

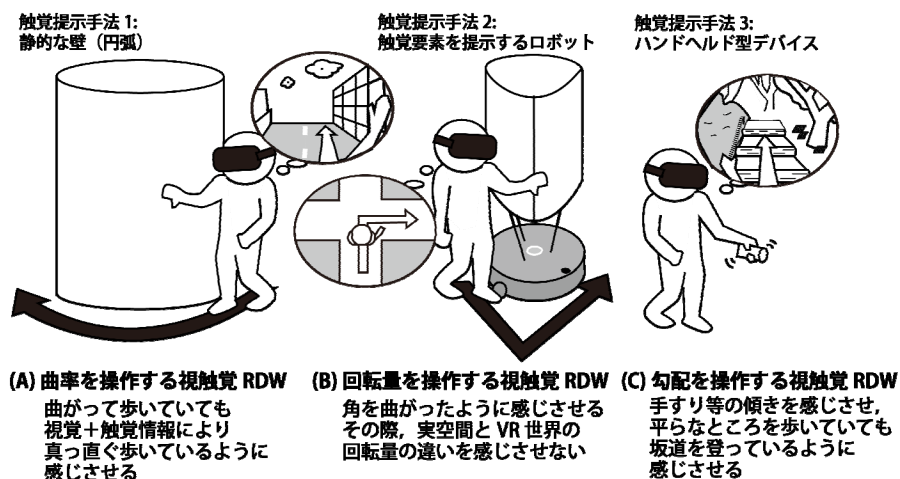


図1 視触覚 Redirected Walking 技術

4. 研究成果

(1) 空間知覚操作に必要な視触覚提示条件の明確化

RDWの要素としては、実空間で曲がって歩かせてもまっすぐ歩いているように感じさせる「曲率操作」、その場で頭部を回転させた時の回転量を操作して空間の向きを変える「回転量操作」、移動距離を実スケールと変化させる「並進移動量操作」がある。これに床面から受ける感覚を変えることで上下の移動感覚を操作する手法を加え、それぞれに対応した空間知覚操作を実現する視触覚相互作用を効果的に生起する情報提示法を明らかにする研究をおこなった。

(A) 視触覚相互作用による曲率の操作

視触覚相互作用による曲率知覚変化の解明と曲率操作 RDW 手法の実現として、さまざまな凸面の壁を触りながら直線または曲線上を歩かせる際、視覚的には直線の壁を提示することで空間知覚がどのように変化するかについて検証を行い、曲率操作の特性を評価した[雑誌2, 学会発表9]。また、半円状の壁を2つ並べて通路を作ることで三叉路を作り出し、より複雑な実環境とバーチャル環境との対応付けを可能にする手法を提案し、Unlimited Corridorを制作した(図2)。Unlimited Corridorでは直径6mの円周上を壁に触れながら歩くことで、VR中での無限歩行が可能になっている。これは視覚のみを使う従来手法の50分の1以下のスペースで無限歩行を実現可能にする大きな成果である。Unlimited CorridorはSIGGRAPH E-techに採択された[学会発表10]他、文化庁メディア芸術祭で優秀賞を獲得するなど、高い評価を受けた。



図2 Unlimited Corridor

さらに、通常曲率操作で用いられるヨー方向の操作に加えて、視野にロール方向の回転操作を加えることで曲率操作を効率化する手法を提案した。ロール方向の回転操作に対する身体への影響として、回転操作と同じ方向へ頭部が傾くことが観測されているが、この方向と逆方向にヨー方向の回転操作を加えることでこの頭部の傾きを抑え、曲率操作に気付きにくくできることを示唆した[雑誌1]。

さらに、通常曲率操作で用いられるヨー方向の操作に加えて、視野にロール方向の回転操作を加えることで曲率操作を効率化する手法を提案した。ロール方向の回転操作に対する身体への影響として、回転操作と同じ方向へ頭部が傾くことが観測されているが、この方向と逆方向にヨー方向の回転操作を加えることでこの頭部の傾きを抑え、曲率操作に気付きにくくできることを示唆した[雑誌1]。

(B) 視触覚相互作用による回転量の操作

回転操作に対応した視触覚 RDW 手法の構築を行った。物体に触れている手を表示する場合、これまでの RDW でとられてきた回転操作のように、バーチャル身体全体を回転させると物体に触れる手の表示位置まで動いてしまい、手と接触物体との位置の整合性がとれなくなる。そこで身体と視点を別個に回転させ、物体に触れている見かけを保ったまま回転操作が可能な手法を構築にした。この手法を用いて実際には四角形のテーブルに触れて周囲を歩いているにも関わらずバーチャル世界では三角形や五角形など異なる形のテーブルに触れて歩いているように感じさせることが可能なシステム“Magic Table”を構築した(図3)。この研究はSIGGRAPH ASIA E-techに採択されている[学会発表6]。

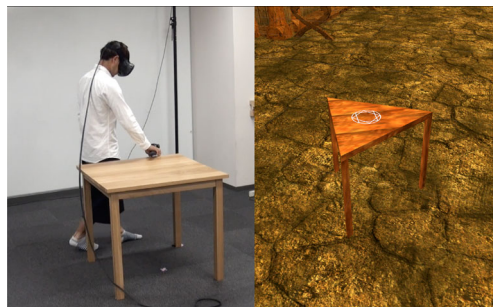


図3 Magic Table

また、従来の回転量操作手法を用いて、その場で回転するのではなく角を曲がらせる場合には、回転量操作をおこなうエリア内でユーザが十分に回転しきらず、回転操作量が不十分となる場合がある。そこで回転操作量が不十分な場合に、その後の直線歩行時に少しずつ補正をかけて回転操作量不足を補う手法“Redirected Turning”を開発し、有効性を示した[学会発表1, 2]。

(C) 視触覚相互作用による昇降感覚・勾配の操作

視触覚相互作用による昇降感覚・勾配知覚変化の解明と昇降感覚・勾配操作 RDW 手法の実現として、階段の昇降感覚を提示する新規 RDW 手法“Infinite Stairs”を提案・実現した(図4)。階段のエッジに相当する箇所の床面に1cmの突起を設置するだけで、視覚操作のみの場合と比べて強い昇降感覚を生起できることを明らかにした[雑誌3, 学会発表8]。このシステムはSIGGRAPH E-techに採択され、またそのシステムの簡易さからNiantic社のPokémon GOをプロモーションする一般向けの展示において技術が活用されるなど、一般への展開も見られた。

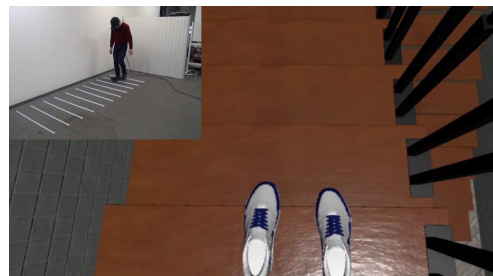


図4 Infinite Stairs

また、ロール方向だけでなくヨー・ピッチ方向にも視点を操作することで床面の勾配や傾斜を表現可能な RDW 手法を提案し、これを取り入れたシステムとしてMobius Walkerを構築した。このシステムはSIGGRAPH ASIA E-techに採択され、E-tech Awardを獲得する等、高い評価を受けた[学会発表7]。

また、ロール方向だけでなくヨー・ピッチ方向にも視点を操作することで床面の勾配や傾斜を表現可能な RDW 手法を提案し、これを取り入れたシステムとしてMobius Walkerを構築した。このシステムはSIGGRAPH ASIA E-techに採択され、E-tech Awardを獲得する等、高い評価を受けた[学会発表7]。

(2) 視触覚 RDW を実現する触覚刺激提示デバイスの構築

昇降感覚提示手法に関して、初期実験に用いた断面が正三角形の三角柱では上昇感覚は提示できるものの、下降感覚についての提示が難しいという結果が得られた。そこで下降感覚と上昇感覚を同様に提示可能な Passive Haptics の突起を選定し、昇降感および現実感の観点からユーザスタディを行い、最適な突起の形状を決定することとした。

提案手法には床より下に足を下げることができないという空間的な制約がある。これを擬似的に解消するため、床面に見立てた小さな斜面を取り付けた図 5 (a), (b) の非対称な突起を用意し、足を下げたと感じられる相対的な高さが提示可能になると考えた。比較対象として断面が正三角形の突起、断面が円形のもの、突起なしの計 5 条件を用意した。

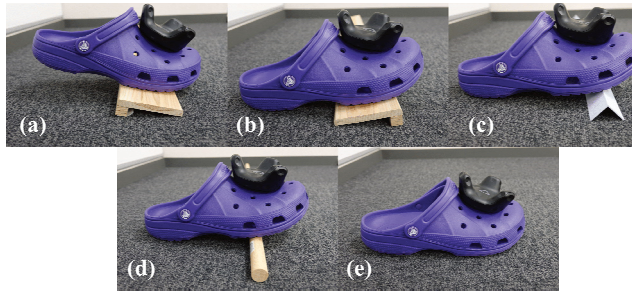


図 5 昇降感覚を提示可能な Passive Haptics の選定

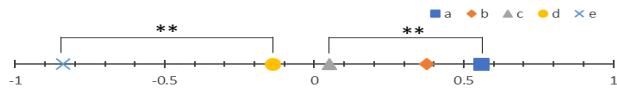


図 6 上昇感覚の強さ

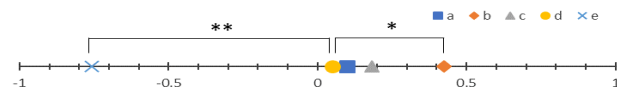


図 7 下降感覚の強さ

5 つの触覚条件を比較するために、官能評価法である Scheffe の一対比較法を用いた。この評価法ではすべての一対の組み合わせに対し、相対評価を行い、各条件に対応した主観的評価値と呼ばれる指標を算出し、順位付けを行うことができる。実験参加者 12 名が 5 つの条件について全 20 通りの対比較を行い、システムに最適な Passive Haptics の条件を決定する。各対比較では、参加者は 2 つの条件のもとでそれぞれ、VE の階段を 5 段分昇降した後、「Q1: いずれの条件が現実の階段に近いか」と「Q2: いずれの条件で強く昇降感覚を感じたか」の 2 つの質問に回答する。Q1 は現実感に、Q2 は昇降感に対応している。階段の上りと下りで異なる結果が予想されるため、ユーザスタディと統計処理は別々に行った。

図 6 に上昇感覚、図 7 に下降感覚の主観的評価値をそれぞれ表す。グラフは値が右に位置するほど強い「昇降感」が得られることを表す。グラフの 5 つの記号 a~e は図 5 に対応している。上昇感覚提示では、「現実感」及び「上昇感」のいずれの指標においても、非対称な形状である条件 (a) の評価値が最大となった。また、(a) は (b) 以外の条件に比べ、評価値が有意に大きいことがわかった ($p < .01$)。下降感覚提示では、「現実感」及び「下降感」のいずれの指標においても、非対称な形状である条件 (b) の評価値が最大となった。また、(b) は (a) 以外の条件に比べ、評価値が有意に大きいことがわかった ($p < .05$)。条件 (a), (b) の違いは、床に設置する向きである。そのため、階段の上りと下りに合わせて、非対称な形状の突起の向きを事前に決め、床面に設置することで、効果的に階段昇降感覚を提示できることが明らかになった。(a), (b) の非対称な突起は、擬似的な踏み面と高さを持つため、床面形状知覚操作に最適であると考えた。以上の実験結果と考察から、ユーザに効果的に昇降感覚を提示できることがわかった[雑誌 3]。

この知見を基に、Passive Haptics ではなく、靴型のデバイスを通じて Active な触覚提示をおこなうことで同等の感覚を生起させる手法の開発も試みた。しかし触覚提示の強度、スピードおよび装置のロバストさ・安全性の観点から、Passive Haptics の方が提案手法に適していることが明らかとなったため、現時点で視触覚 RDW を実現する上では Passive Haptics を活用することが適しているという指針を得た[学会発表 4]。

(3) 視触覚 RDW 手法の統合と検証実験・実応用を通じた効果と有効性の定量的評価

各手法を統合的に扱い、最適な活用をするために機械学習ベースの RDW 制御器を構築した。シミュレーションを通じて、この手法では従来のヒューリスティックな手法に比べて、ユーザの没入感を阻害するリセット操作の回数を抑えて効果的な RDW を実現できることを確認した。また、RDW 中の人の知覚を評価する手法として、歩容解析を利用する手法を提案し、実際に知覚と歩容の間に関係性があることを見いだすことができた。

また、これまで作成してきた視触覚 RDW システムである Unlimited Corridor を改良し、壁ではなく手すりを使った Unlimited Corridor Handrail Ver. を構築した。このシステムは「めがねと旅する美術展」において招待展示され、青森、島根、静岡を巡回し、多くの体験者を得た。ここで得られたデータから触覚提示手法の差異は視触覚 RDW の効果に差

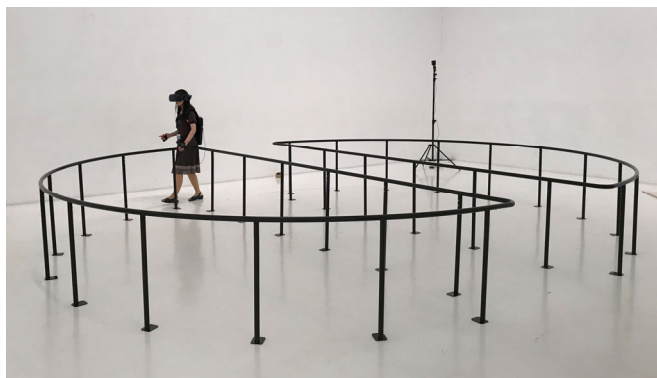


図 8 めがねと旅する美術展において巡回展示された Unlimited Corridor Handrail Ver.

を生まないことを明らかにするとともに、触覚提示をおこなわない条件との比較実験を通じて触覚提示が RDW の効果を強めることを確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- ①山本達己, 松本啓吾, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝: ヨー方向とロール方向の複合的視点操作によるリダイレクテッドウォーキング, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 23, No. 3, pp. 259-168, 2018 年 9 月.
- ②松本啓吾, 鳴海拓志, 伴祐樹, 谷川智洋, 廣瀬通孝: 視触覚間相互作用を用いた曲率操作型リダイレクテッドウォーキング, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 23, No. 3, pp. 129-138, 2018 年 9 月.
- ③Ryohei Nagao, Keigo Matsumoto, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose: Ascending and Descending in Virtual Reality: Simple and Safe System Using Passive Haptics, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG), Vol. 24, No. 4, pp. 1584-1593, 2018.
- ④鳴海拓志, クロスモーダル知覚のインタフェース応用, 映像情報メディア学会誌, Vol. 72, No. 1, pp. 2-7, 2018 年 1 月.

〔学会発表〕(計 10 件)

- ① Junya Mizutani, Keigo Matsumoto, Ryohei Nagao, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose: Estimation of Detection Thresholds for Redirected Turning, IEEE VR 2019, March 2019.
- ② Junya Mizutani, Keigo Matsumoto, Ryohei Nagao, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose: Error Correction in Redirection: Rotational Manipulation for Natural Walking and Control of Walking Paths, ICAT-EGVE 2018, 2018.
- ③ Keigo Matsumoto, Takuji Narumi, Yohei Yanase, Yuki Ban, Tomohiro Tanikawa and Michitaka Hirose: Visuo-haptic Redirected Walking Using Handrail, ICAT-EGVE 2018, 2018.
- ④ 長尾涼平, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝: 圧覚を用いた階段昇降感覚の提示, 第 23 回バーチャルリアリティ学会大会, 22D-1, 2018.
- ⑤ Tatsuki Yamamoto, Keigo Matsumoto, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose: Adopting the Roll Manipulation for Redirected Walking, IEEE VR 2018, 2018.
- ⑥ Keigo Matsumoto, Takeru Hashimoto, Junya Mizutani, Hibiki Yonahara, Ryohei Nagao, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa and Michitaka Hirose: Magic Table: Deformable Props Using Visuo Haptic Redirection, SIGGRAPH ASIA 2017 Emerging Technologies, Nov. 2017.
- ⑦ Tatsuki Yamamoto, Jumpei Shimatani, Isamu Ohashi, Keigo Matsumoto, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa and Michitaka Hirose: Mobius Walker: Pitch and Roll Redirected Walking, SIGGRAPH ASIA 2017 Emerging Technologies, Nov. 2017.
- ⑧ Ryohei Nagao, Keigo Matsumoto, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose: Infinite Stairs: Simulating Stairs in Virtual Reality based on Visuo-haptic Interaction, SIGGRAPH2017 Emerging Technologies, July 2017.
- ⑨ Keigo Matsumoto, Takuji Narumi, Yuki Ban, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose: Turn physically curved paths into virtual curved paths, IEEE VR 2017, Mar. 2017.
- ⑩ Keigo Matsumoto, Yuki Ban, Takuji Narumi, Yohei Yanase, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose: Unlimited Corridor: Redirected Walking Techniques using Visuo Haptic Interaction, SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies, July 2016.

〔図書〕(計 1 件)

- ① 廣瀬 通孝 (監修), 東京大学バーチャルリアリティ教育研究センター (編集), トコトンやさしいVRの本, 日刊工業新聞社, 2019. (分担執筆: 鳴海拓志)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ: <http://www.cyber.t.u-tokyo.ac.jp/~matsumoto/unlimitedcorridor.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：松本啓吾

ローマ字氏名：MATSUMOTO, Keigo

※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。