

複数経路上を歩行移動可能な テレプレゼンスシステムにおける違和感の低減に関する検討

和田 浩明 池田 聖 佐藤 智和 横矢 直和
奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

あらまし 本研究では、全方向に歩行可能な歩行装置上における利用者の歩行動作に応じた全方位動画の提示により、遠隔地における複数経路上での歩行移動感覚を再現するテレプレゼンスシステムの開発を目指す。このようなシステムでは、利用者の仮想視点の移動可能な範囲が動画の撮影経路上に制限されることにより生じる違和感が問題となる。本稿では、このような違和感を低減させる画像提示手法として、(I) 利用者を視点移動が可能な方向に誘導する、(II) 視点移動が可能な範囲から外れた場合に利用者に提示する画像として違和感が少ないものを選択する、という2つの側面から検討を行い、被験者実験によって違和感低減手法の評価結果を示す。

Reduction of Unnatural Feeling in a Telepresence System Providing Multiple Walk-through Routes

Hiroaki WADA Sei IKEDA Tomokazu SATO Naokazu YOKOYA
Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

Abstract: This paper describes a telepresence system where a user can virtually walk along multiple camera paths of presented omnidirectional videos. We propose two methods to reduce user's unnatural feeling caused by the limitation of movable area of the virtual view point. One of them is to lead user's walking toward the movable direction by displaying camera path information. The other is to control presented video frames to reduce the unnatural feeling even if the user walks to unmovable direction of the view point. In experiments, subjective evaluations using a prototype system are shown.

1 はじめに

遠隔地での事象を没入感の高い画像提示装置などを用いて再現し、あたかも遠隔地に居るかのような感覚を与えるテレプレゼンス技術は、娯楽、教育、医療などの分野への応用が期待される。この技術を用いたテレプレゼンスシステムでは、写実性の高い実画像を利用者に提示し、仮想空間内での自由な視点移動および視線変更を再現することで高い臨場感を与えることができる。実画像を用い、自由な視点移動や視線変更が可能なテレプレゼンスシステムとしては、任意視点画像生成技術を用いたシステム [1,2] が挙げられる。これらは利用者の仮想的な視点位置が制限されず任意の視点位置の画像を提示できるが、対象の形状に関しては単純なものが想定されており、自然環境などの広域で複雑な環境において写実性の高い画像を生成することは難しい。これに対して、あらかじめ取得した広視野角な動画系列を要求に応じて順に提示することで、画像が取得された経路上

を移動し、自由に視線変更が可能なテレプレゼンスシステム [3-5] が提案されている。これらの手法では、視点移動の可能な範囲が動画系列の撮影経路上に制限されるが、遠隔地の情景を広範囲に高い写実性を保ったまま再現することができる。

本研究では、後者のテレプレゼンスシステムにおいて、遠隔地における複数の経路上での歩行移動感覚を再現する手法の開発を目指す。本システムでは、全方向に歩行可能な歩行装置上において利用者の歩行移動量を検出および相殺し、これに応じて全方位マルチカメラシステムにより取得された複数の経路上を移動する動画を没入型ディスプレイに提示することで、歩行移動中の視界を再現する。本研究では、このようなシステムにおいて複数経路を提示する際の問題点である (1) 仮想環境中の進行可能な方向や異なる経路の交差位置を利用者が把握できずスムーズな移動が困難となる、(2) 利用者の歩行移動量と仮想視点移動量の不一致により臨場感が損なわれる、の2つの解決を図る。経路の把握の問題 (1)

に対しては従来、経路の交差点付近で矢印などの進行可能な方向の提示 [5, 6] や、撮影経路と仮想視点位置を示した地図 [5, 7] を表示する手法が提案されているが、本研究においても、これらと同様に経路情報を実画像上に付加し視点移動が可能な方向に利用者を誘導する。ただし、矢印や地図のように実環境中に存在し得ない物を表示することにより現実感が損なわれる可能性があり、特に地図の表示は利用者の視覚を遮り没入感を減じると考えられる。本研究では、視点移動が可能な経路情報を地面上に描き道路標示のように表示することで、経路情報を認識させる。

利用者の歩行移動量と仮想視点移動量の不一致による違和感の問題 (2) に対しては、経路の交差点付近でのみ任意視点画像を生成し、視点移動量の不一致が生じないようにすることが可能である [8]。しかしすでに述べたように、このようなアプローチでは、自然情景など複雑な環境を高い写実性で再現することは難しい。そこで本研究では、利用者の歩行が視点移動可能な範囲から外れた場合に生じる違和感を最小限にする提示画像フレームの決定手法を検討する。

本稿では、まず 2 章では、複数経路上を歩行移動可能なテレプレゼンスシステムについての設計方針と実装方法を示す。3 章では視点移動範囲の制限に起因する違和感の低減のための手法について述べ、4 章では、この手法についての被験者実験を示す。最後に 5 章でまとめを述べる。

2 複数経路上を歩行移動可能な テレプレゼンスシステム

2.1 システムの設計方針

テレプレゼンスシステムが、遠隔地での歩行移動感覚を高臨場に再現するためには、(A) 仮想環境内において利用者の視界が写実性高く描画された遠隔地の情景画像で覆われていること、および (B) 利用者の運動感覚を正しく再現することの 2 点が要求される。前者の要求 (A) を満たすために、高解像・広視野角なカメラにより実画像を取得し、没入型ディスプレイに投影することとする。この際、写実性の観点から操作メニューや注釈、地図など実環境中に存在し得ない物や視界を遮る物は仮想環境内に配置しないようにすべきである。経路情報のような付加情報は、利用者に違和感を与えないために日常経験的に見慣れている図形と類似した形や位置に表示する [9]。

一方、後者の要求 (B) については、歩行装置によ

り歩行移動を相殺し、動画像提示することで運動感覚を再現する。このような運動感覚の再現では、前提感覚系や深部感覚系など視覚系以外の感覚系と視覚系の間を再現する必要がある。これらの感覚系を通して人間が感じることでできる頭部の運動に関する物理量として環境に対する頭部の角速度、角加速度、並進速度、並進加速度、位置、姿勢が挙げられる。このうち、角度、角速度、角加速度の変化については首振り動作などの視線変更に伴い知覚されるものであるが、単純に没入型ディスプレイを利用することにより、視覚による運動感覚と、その他の感覚系によるものとの間を矛盾なく再現することが可能である。これに対して、並進加速度については、基本的に視覚とその他の感覚を一致させることは難しく、並進速度および位置の感覚は、仮想視点の移動範囲が撮影経路上に限定されるため、完全に再現することは難しく、経路に沿った方向などの一部の成分のみの再現が可能である。そのため、画像フレームの決定は、並進速度および位置の感覚の再現を考慮して行う。

2.2 システムの実装

前述の設計方針に基づき決定したテレプレゼンスシステムの機器構成および仮想環境用の動画像の生成手法について述べる。本研究で用いる画像提示システムは没入型ディスプレイと歩行動作インタフェースからなる。画像提示システムの外観を図 1 に示す。没入型ディスプレイは、3 面の傾斜スクリーンとプロジェクタ (1024×768) からなり、各プロジェクタにつき 1 台の計算機 (CPU: Intel Pentium4 1.8GHz, Graphics Card: Geforce4 Ti4600) が接続されている。3 面傾斜スクリーンは、利用者の全視野を覆い高い没入感を与えることが可能であり、背面投影により画像が提示される。スクリーン 1 面につきプロジェクタ 4 台用いられ、高解像な画像提示が可能となる。プロジェクタを制御する計算機には、あらかじめ生成された画像が蓄積されおり、後述する歩行動作インタフェースを制御する計算機とは 100 Mbps の有線 LAN により接続されている。一方の歩行動作インタフェースは、歩行装置とレンジファインダ (Sick LMS200)、これらを制御する計算機 (CPU: Intel Pentium4 2.4GHz) から構成される。歩行装置は、全方向に歩行移動が可能なトレッドミル [10] を用い、両足の重心位置を相殺するように制御される。レンジファインダは、歩行装置のベルトの前方に配置され、利用者の両足の重心位置を検出する。歩行動作インタフェースを制御する計算機は、トレッドミル上の床面の移動速度

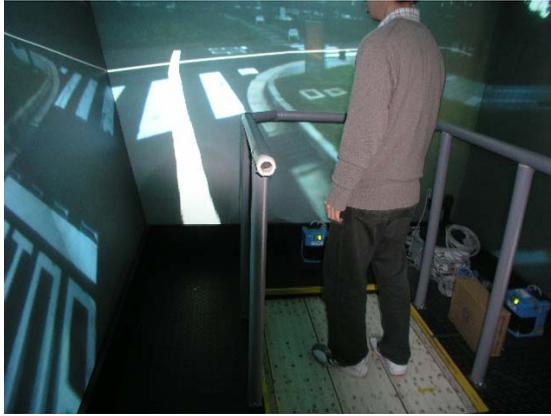


図 1: 没入型ディスプレイと歩行装置の外観

を利用者の速度 v として、これを入力として提示すべき画像フレームを決定し、各画像提示用計算機に送信する。

次に仮想環境の生成方法について述べる。提示画像の生成には、全方位動画像に加えて経路情報を付加するために位置姿勢情報の推定が必要である。全方位動画像の取得では、高解像・広視野角な Point Grey Research 社のマルチカメラシステム Ladybug を用いる。Ladybug は放射状に合計 6 つのカメラユニットが配置されており全天球の約 75% の視野を一度に撮影可能であり、各ユニットはそれぞれ 768×1024 画素の解像度の画像を秒間 15 枚撮影できる。歩行時の視界を再現するために、Ladybug は目線の高さ付近になるよう電動車いすに取り付け、移動しながら撮影を行う。カメラの位置・姿勢情報は、ランドマークと特徴点追跡を用いる手法 [11] により推定する。ランドマークの 3 次元位置は、あらかじめトータルステーションにより計測しておく。以上のようにして、取得した全方位動画像とカメラ位置・姿勢情報から、カメラの姿勢変動を除去し、利用者の視点位置から幾何学的に正しく見える画像を生成する [12]。

3 視点移動範囲の制限に起因する違和感の低減手法

3.1 経路情報の重畳表示

仮想環境中の進行可能な方向や異なる経路との交差位置を利用者に伝えるために経路情報の表示を行う。経路情報として撮影経路の位置を示したものを画面上に重畳表示する。表示する経路情報は、利用者の視点移動が可能な経路位置と経路選択が可能な範囲が示される。視点移動が可能な経路は、利用者に随時歩行可能な経路を認識させることで視点移動

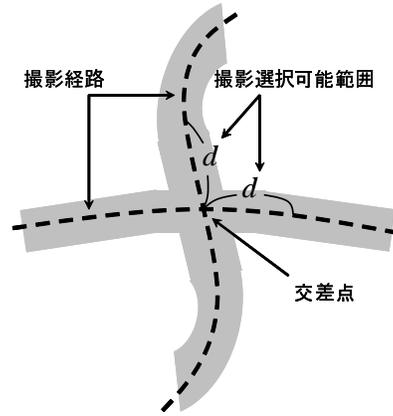


図 2: 標示図形例

が可能な方向に誘導し、経路選択が可能な範囲は、利用者に意図する経路を円滑に選択させる。

(a) 経路位置情報 経路位置情報として、動画像上に図 2 中の曲線状の帯で表される視点移動が可能な経路を表す図形を重畳表示する。この表示により示される情報および表示方法について述べる。利用者に示される情報には、進行可能な方向、経路の形状、経路と経路の接続関係がある。進行可能な方向は、利用者を仮想視点が用意されている方向に誘導し、経路の形状は、矢印などの方向のみの表示と比較して経路の曲がり具合を認識させるため、利用者の円滑な歩行移動を実現させる。また経路の接続関係は、経路の交差点位置と分岐後の経路の方向が示される。これらの経路情報は、各フレームのカメラ位置直下の地面上に描かれているかのように表示する。これにより周囲の環境と経路上の各点との位置関係を容易に把握できるようにする。また、道路標示と類似した位置と形にすることで、違和感の低減を図る。経路情報の重畳表示例を図 1 に示す。

(b) 経路選択可能範囲 交差点の位置を交差する 2 つの経路に対応するフレームのカメラ位置の最近傍点対の中点とし、交差点から一定距離 d の範囲内を経路選択可能範囲とする。この範囲に利用者の視点がある場合に、異なる経路への移動を許す。仮想環境の床面には歩行装置があるため、利用者の視点位置が経路選択可能な範囲にいる場合、交差点を見ることができない。本研究では、経路選択可能範囲の表示方法として、重畳表示する図形の色を変化させることとする。

3.2 提示フレーム決定手法の検討

利用者の歩行が視点移動可能な範囲から外れたときに違和感の少ない画像を提示するための、提示フ

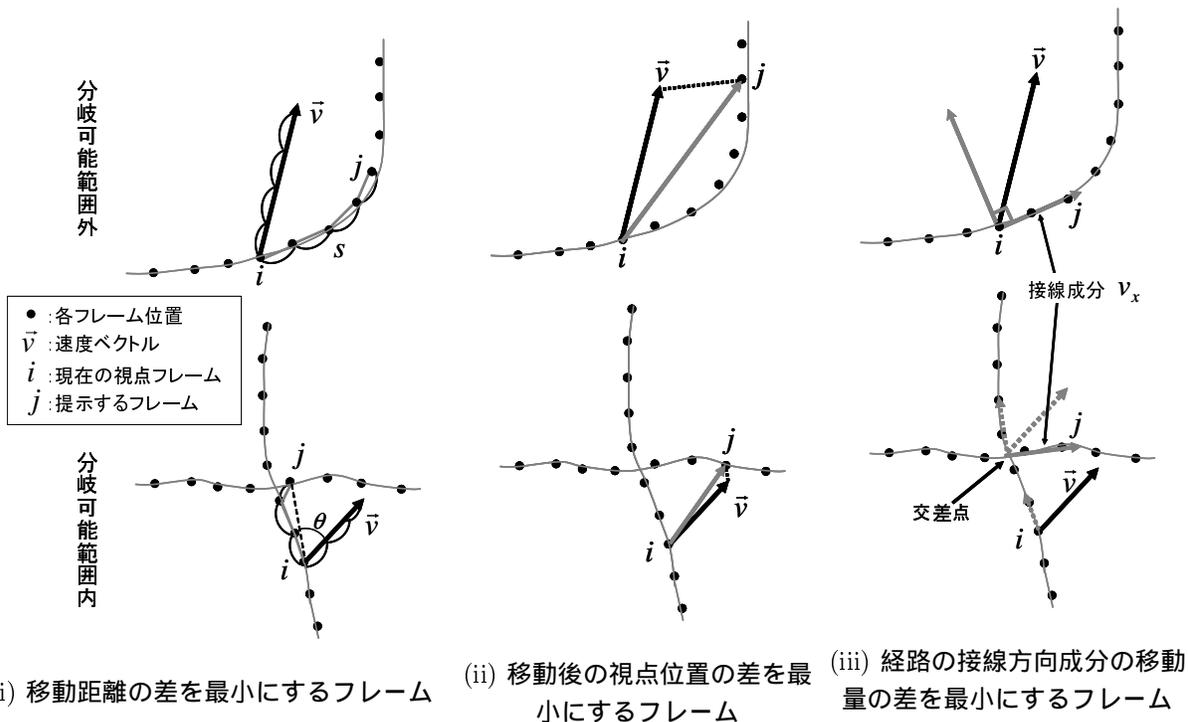


図 3: 提示フレーム決定法

フレーム決定手法について検討する．提示フレームは，歩行速度ベクトル \vec{v} と，現フレームのカメラ位置によって決定する．本研究では，ただし速度ベクトルとは，現在と微小時間前の利用者の位置ベクトルの差とする．

(i) 移動距離の差を最小にするフレーム 利用者の歩行移動量と仮想視点の移動量を等しくすることで違和感の軽減を図る．図 3(i) に示すように現在の視点位置であるフレーム i のカメラ位置 \vec{P}_i からフレーム j のカメラ位置 \vec{P}_j までの経路に沿った距離 s が利用者の移動量 $|v|$ に等しいフレーム j を提示する．ただし，経路選択可能範囲内のようにフレーム j の候補が複数ある場合は，移動後の視点位置現在の視点位置に対してなす角 θ が最小となるフレームとする．

(ii) 移動後の視点位置の差を最小にするフレーム 歩行による移動後の視点位置と仮想視点位置の差を最小とすることで，違和感の軽減を図る．図 3(ii) に示すように現在の視点位置であるフレーム i のカメラ位置 \vec{P}_i からフレーム j のカメラ位置 \vec{P}_j へのベクトル $(\vec{P}_j - \vec{P}_i)$ と利用者の速度ベクトル \vec{v} のユークリッド距離が最小となるフレーム j を提示する．

(iii) 経路の接線方向成分の移動量の差を最小にするフレーム 利用者の速度ベクトルを経路に対する接線成分と法線成分に分け，接線成分と仮想視点の移動量を等しくすることで違和感の軽減を図る．図 3(iii)

に示すように視点位置であるフレーム i のカメラ位置 \vec{P}_i からフレーム j のカメラ位置 \vec{P}_j を示すベクトル $(\vec{P}_j - \vec{P}_i)$ と経路に対する利用者の歩行速度ベクトルの接線成分が等しいフレーム j を提示する．ただし，フレーム i が経路選択可能範囲内にある場合は，仮想視点を経路の交差点上を基準と考え，接線成分が最大となるものと $(\vec{P}_j - \vec{P}_i)$ を比較する．

4 違和感低減手法の評価

提案した違和感の低減手法に関する評価実験を示す．画像提示手法については 3 つの候補があるため，まず最も違和感を低減するが提示フレーム手法を決定し，次に決定した提示フレームの決定法を用いて，経路情報の効果について確認する．

4.1 提示フレーム決定手法の評価

最適な提示フレーム決定手法を評価するために，提案手法を用いた試作システムを構築し，被験者実験を行った．実験では，被験者に試作システム上での歩行移動をタスクとして与え，(i) 移動距離の差を最小にするフレーム，(ii) 移動後の視点位置の差を最小にするフレーム，(iii) 経路の接線方向成分の移動量の差を最小にするフレーム，の 3 つの提案手法について，被験者の主観評価およびタスクの達成に要する時間 [sec]，経路からの視点位置のずれ量の平均 [rad] を指標に用いて評価を行う．ただし，経路から

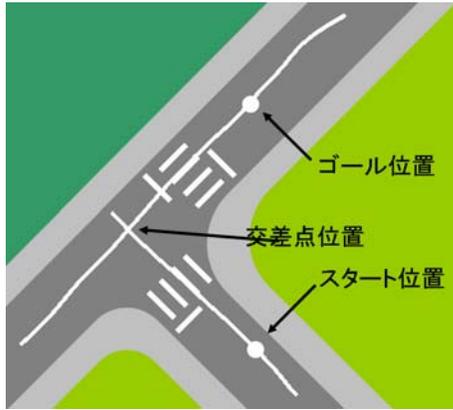


図 4: 画像提示手法の評価に用いた歩行経路

の視点位置のずれ量は、経路の接線方向と歩行方向の角度の差とした。タスクは、図 4 に示す 2 つの撮影経路が交差した経路のスタート位置を出発し交差点で右折し、ゴール位置までの約 25 m、500 フレームの歩行移動とした。

実験手順は、以下の通りである。20 歳代の健康者 5 名に対して、実験前に歩行装置の使用法や注意点について口頭での説明ののちに、歩行装置に十分に慣れるための練習時間を与えた。次に 3 つの提案手法につき 1 回ずつの試行を行った。ただし、その順序はランダムとした。3 回の試行終了後に被験者には、アンケートについて回答させた。アンケートの設問内容は、3 回の試行の中で違和感が少なかった試行の順を示すというものである。また実験条件として、経路情報は全ての経路を提示し、経路選択可能範囲は経験的に $d = 0.5[m]$ とした。

提示フレーム決定手法の評価結果として、表 1 にこのアンケートの回答結果を、表 2 に経路の歩行移動にかかった時間を、表 3 に経路の接線方向と歩行方向の角度の差の平均を示す。表 1 に示すアンケート結果は、この結果では手法 (i) と手法 (ii) に評価が 2 分されたことが分かる。手法 (iii) の得点が低かった原因として、アンケート回答時に被験者から得たコメントのひとつに、“手法 (iii) は歩行移動量に対して仮想視点の移動量が小さく感じた” というものがあり、仮想視点と歩行の移動量の不一致が認識されたと考えられる。歩行移動にかかった時間についても、表 2 に示すように被験者 5 名全員が最も移動時間を費やしていることが確認でき、手法 (i) と手法 (ii) の評価は 2 分されたため、表 1 の結果を裏付けるものと考えられる。経路の接線方向と歩行方向の角度の差の平均結果 (表 3) では、被験者 5 名中 4 名が手法 (ii) で最小であり、被験者 5 名全員が手法 (i) で

表 1: アンケートによる画像提示手法評価

	手法 (i)	手法 (ii)	手法 (iii)
得点	12.5	12.5	5

表 2: 画像提示手法評価における歩行時間 [sec]

	手法 (i)	手法 (ii)	手法 (iii)
被験者 A	47.7	44.4	89.1
被験者 B	36.3	46.0	84.7
被験者 C	48.8	64.2	112.8
被験者 D	46.8	64.7	100.9
被験者 E	50.4	41.4	82.0

最大となった。以上のことから、手法 (i) と手法 (ii) の評価結果に大きな差は見られないが、経路とのずれの平均が小さく被験者に意識させずに経路に近い位置を歩かせた手法 (ii) が、最適な提示フレーム決定手法であると考えられる。

4.2 経路情報提示による効果の確認

経路情報提示による効果を確認するため、前節の結果を用いて被験者実験により評価を行った。実験では、被験者にタスクを与え、(イ) 歩行可能な方位、(ロ) 歩行可能な方位と経路の形状、(ハ) 歩行可能な方位と経路の形状と経路の接続関係、の 3 種類の経路情報について、被験者の主観評価およびタスクにかかる時間 [sec]、経路からの視点位置のずれの量 [rad] を指標に用いて評価を行う。ただし、歩行可能な方位 (イ) の提示は利用者の位置から 2 m の範囲のみの経路情報を表示することで実現し、歩行可能な方位と経路の形状 (ロ) については、4 m の範囲、歩行可能な方位と経路の形状と経路の接続関係 (ハ) については、全ての経路とした。また被験者に与えたタスクは、分岐点は含まないが複数の曲率を持つ曲がりくねった経路における約 40 m、1,000 フレームの歩行移動とした。実験手順は前節と同じである。

経路情報提示による効果の評価結果として、アンケートの回答結果を表 4 に示す。経路の形状と歩行経路全ての経路情報を提示した場合の評価が高いことが分かる。複数の曲率を持つ経路では、経路の形

表 3: 画像提示手法評価における歩行の方位差 [rad]

	手法 (i)	手法 (ii)	手法 (iii)
被験者 A	0.300	0.288	0.249
被験者 B	0.424	0.340	0.376
被験者 C	0.467	0.352	0.438
被験者 D	0.714	0.616	0.698
被験者 E	0.330	0.271	0.273

表 4: アンケートによる経路情報評価

	経路の方位	経路の形状	経路全て
得点	8	12	10

表 5: 経路情報評価における歩行時間 [sec]

	手法 (i)	手法 (ii)	手法 (iii)
被験者 A	72.6	69.6	64.8
被験者 B	62.6	65.3	66.9
被験者 D	66.8	69.2	66.2
被験者 E	75.4	77.9	76.3
被験者 F	68.8	65.2	73.7

状が認識できる程度の経路情報が必要であるといえる。アンケート回答時に被験者から得られたコメントからは、歩行経路全てを表示することによる景観の悪化が指摘された。これに対しては、オクルージョンについて考慮して経路情報を表示することなどが考えられる。また表 5 および表 6 に示すように経路歩行にかかる時間と経路からの視点位置のずれ量の平均には、大きな差が見られなかった。

5 まとめ

遠隔地における複数の経路上を歩行移動する感覚を再現するテレプレゼンスシステムにおいて生じる問題を低減させる手法を提案し、被験者実験により評価を行った。利用者の仮想視点の移動範囲が動画の撮影経路上に制限されるため、(1) 仮想環境中の進行可能な方向や異なる経路の交差位置を利用者が把握できずスムーズな移動が困難となる、(2) 利用者の歩行移動量と仮想視点移動量の不一致により臨場感が損なわれる、という問題があった。これに対して本稿では、(I) 利用者を視点移動が可能な方向に誘導する、(II) 視点移動が可能な範囲から外れた場合に利用者に提示する画像フレームには違和感が少ないものを選択する、という 2 つの側面から手法を提案した。

被験者実験では、利用者の速度ベクトルと仮想視点の移動ベクトルの差を最小とするフレームを提示

表 6: 経路情報評価における歩行の方位差 [rad]

	手法 (i)	手法 (ii)	手法 (iii)
被験者 A	0.223	0.279	0.230
被験者 B	0.180	0.156	0.168
被験者 D	0.218	0.320	0.257
被験者 E	0.305	0.327	0.400
被験者 F	0.273	0.326	0.323

し、利用者の位置と仮想視点の位置を近づけることで違和感が最も軽減される可能性を確認した。また道路標示に類似した形と位置の経路情報を表示することで、違和感を最低限に抑えながら経路情報を認識させることができた。今後は、誤差の要因をできる限り排除し、さらに詳しい実験を行うことが望まれる。

参考文献

- [1] 遠藤隆明, 片山昭宏, 田村秀行, 広瀬通孝. 写実的な広域仮想空間構築のための画像補間手法. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 2, pp. 185-192, 2002.
- [2] H. Kawasaki, M. Murao, K. Ikeuchi, and M. Sakauchi. Enhanced navigation system with real images and real-time information. *Proc. of 8th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITSWC2001)*, 2001.
- [3] T. Pintaric, U. Neumann, and A. Rizzo. Immersive panoramic video. *Proc. of the 8th ACM Int. Conf. on Multimedia*, pp. 493-494, 2000.
- [4] C. J. Taylor. Videoplus: A method for capturing the structure and appearance of immersive environments. *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol. 8, No. 2, pp. 171-182, 2002.
- [5] M. Uyttendaele, A. Griminisi, S. Winder SB Kang, R. Szeliski, and R. Hartley. Image-based interactive exploration of real-world environments. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 24, No. 3, pp. 52-63, 2004.
- [6] A. J. Woods, D. Offszanka, and G. Martin. A pc-based stereoscopic video walkthrough. In *Proc. SPIE 1999*, Vol. 3639, pp. 306-312, 1999.
- [7] 加藤浩二, 石黒浩. Town digitizing -全方位カメラと GPS による実時間街モデリング-. 情報処理学会研究会報告 CVIM, Vol. 125, pp. 111-118, 2001.
- [8] M. Hirose. Space recording using augmented virtuality technology. *Proc. 2nd Int. Symp. on Mixed Reality (ISMR2001)*, pp. 105-110, 2001.
- [9] 和田浩明, 池田聖, 佐藤智和, 横矢直和. 複数経路上を歩行移動可能なテレプレゼンスシステムにおけるユーザ支援手法. 日本バーチャルリアリティ学会第 10 回大会, 2005.
- [10] H. Iwata. Walking about virtual environments on an infinite floor. In *Proc. IEEE Virtual Reality '99*, pp. 286-293, 1999.
- [11] 佐藤智和, 池田聖, 横矢直和. 複数動画からの全方位型マルチカメラシステムの位置・姿勢パラメータの推定. 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol. J88-D-II, No. 2, pp. 347-357, 2005.
- [12] S. Ikeda, T. Sato, and N. Yokoya. High-resolution panoramic movie generation from video streams acquired by an omnidirectional multi-camera system. *Proc. IEEE Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent System*, pp. 155-160, 2003.