

# テレプレゼンスにおける モーションベースと没入型ディスプレイを用いた慣性力の再現

堀 磨伊也<sup>†</sup> 神原 誠之<sup>†</sup> 横矢 直和<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

E-mail: †{maiya-h,kanbara,yokoya}@is.naist.jp

あらまし 本報告では、テレプレゼンスにおいてモーションベースを用いることにより車両走行時の臨場感を向上させる手法の提案を行う。低自由度のモーションベースを用いたテレプレゼンスに関する従来研究では、臨場感を向上させる要因のひとつで遠心力に代表される加速度が発生する運動時の慣性力の再現は行われていなかった。提案手法では、低自由度の汎用モーションベースと没入型ディスプレイを用いて、ユーザの重力を利用することにより擬似的な慣性力を再現する。ユーザに与える慣性力の大きさは、車両走行時に撮影された動画像から走行車両の運動を推定することにより自動的に推定する。実験では、減速・旋回など単純な運動時にユーザが体感する慣性力の再現結果を示し、さらにエンターテインメント分野の一例としてジェットコースターを擬似的に体験するテレプレゼンスシステムの構築し、走行時の慣性力の再現を行うことにより本手法の有効性を示す。

キーワード テレプレゼンス, 複合現実感, 慣性力, モーションベース, Structure-from-motion

## Realization of Inertial Force Sensation for Telepresence Using Motion Base and Immersive Display

Maiya HORI<sup>†</sup>, Masayuki KANBARA<sup>†</sup>, and Naokazu YOKOYA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

8916-5 Takayama, Ikoma, Nara, 630-0192 Japan

E-mail: †{maiya-h,kanbara,yokoya}@is.naist.jp

**Abstract** This report describes a telepresence system for a ride to provide the user with a highly realistic sensation by using a motion base. The conventional studies using a motion base with a few degrees of freedom have never investigated an inertial force generation when a ride accelerates because a motion base cannot realize a same motion of the real ride. This report proposes a new telepresence system which can provide a user with an inertial force sensation by using a motion base with a few degrees of freedom and an immersive display. In our research, the inertial force sensation is generated from acceleration of gravity by inclining the motion base. An amount of the inclination given to the user is estimated from the image sequence which is captured by an omnidirectional camera on the running ride. In experiments, the inertial force sensation is realized by using a motion base and an immersive display.

**Key words** Telepresence, Mixed reality, Inertial force, Motion base, Structure-from-motion

### 1. はじめに

遠隔地の情景を提示し、その場にいるかのような感覚を与える仮想現実感技術はテレプレゼンス[1]と呼ばれ、遠隔医療や教育、エンターテインメントなどの分野で応用が期待されている。近年、テレプレゼンスにおいて現実環境の情報を様々なセンサで取得し、仮想化環境を構築する研究が盛んに行われてい

る。現実環境の情報を取得する代表的な手法の一つとして全方位カメラやマルチカメラ[2],[3]で撮影された全方位動画像が挙げられる。全方位動画像は通常のカメラで撮影された映像に対して広視野の情報を同時に取得するため、あらゆる視線方向の映像を生成できるという利点がある。

一方、加速度センサや姿勢センサによって取得される振動や傾きなどの力覚情報を用いて仮想化環境を構築する研究が行



図1 モーションベースを用いた実験環境の例

われている。Speers [4] はジェットコースターが走行しているときに発生する力を解析し、実際の走行時に計測される加速度と比較実験を行っている。これらの力覚情報は、テレプレゼンスにおいて平行移動・回転が可能なモーションベースによってユーザに提示される。モーションベースは運動している車両のシミュレーションにおいて有用であるが、実際の車両と同様の感覚を得るためには高い自由度と広い可動範囲を持つモーションベースが必要である [5]~[7]。しかし、高い自由度と広い可動範囲を持つモーションベースは、高価で広い設置場所を必要とするため、一般的なモーションベースは自由度が低く可動範囲が制限される場合が多い。一方、2自由度のみを持つ低自由度のモーションベースによりジェットコースターのシミュレーションを仮想現実感技術を用いて行う研究 [8] では、車両の傾きの再現は行っているものの、ジェットコースターが加速度が発生する運動をする際に一定時間継続して働く慣性力を再現していないため、臨場感が損なわれる問題があった。

本研究では、加速度が発生する運動時に撮影された全方位動画画像から2自由度のみのモーションベースを用いてユーザに慣性力を体感させるテレプレゼンスシステムの構築を試みる。提案手法では2自由度のモーションベースと没入型ディスプレイを用いて、ユーザの重力から擬似的な慣性力を再現する。図1にモーションベースと没入型ディスプレイを用いたテレプレゼンスシステムの例を示す。提案手法では、ユーザの重力から擬似的な慣性力を再現するため、現実環境におけるユーザの実際の傾きを認識させないために没入型ディスプレイを利用する。没入型ディスプレイに現実環境におけるユーザの傾きを考慮した実シーンを提示することにより、ユーザの重力から擬似的な慣性力を生成する。

モーションベースに与える傾きは、現実環境においてユーザが体感する慣性力と重力から算出する。慣性力は加速度が発生する運動時に加速度が働く方向とは逆方向に働く見かけ上の力であるため、ユーザに与える慣性力は加速度から算出する。加速度は、運動時に撮影された全方位動画画像から structure-from-motion 法 [9] に基づいて推定されたカメラ外部パラメータを用いて自動的に推定する。全方位動画画像を用いることにより単眼カメラから撮影された動画画像に対して精度の高いカメラ外部パラメータ

の推定が可能である。

以下、2節では、モーションベースを用いた慣性力の再現手法について詳述し、3節では、提案手法を用いた実験として、モーションベースと没入型ディスプレイを用いて試作テレプレゼンスの構築を行った結果を示す。最後に4節で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

## 2. モーションベースを用いた慣性力の再現

提案手法では、加速度が発生する運動時にユーザが体感する慣性力を2軸の可動軸を持つモーションベースを用いて再現する。一般的にモーションベースは可動軸と可動範囲に制限があるため、実環境と同様の動作を行うことが困難である。本研究では、テレプレゼンスにおいて慣性力をユーザの重力から擬似的に生成することで臨場感の向上を図る。図2に慣性力の生成手法の概念図を示す。現実環境では、加速度が発生する運動による慣性力とユーザ自身の重力がユーザに働く。テレプレゼンス環境では、これらの力をユーザの重力のみから擬似的に生成する。慣性力の方向および大きさは加速度に依存して変化するが、テレプレゼンス環境においてユーザの重力の大きさおよび働く方向は変化しないため、本手法ではモーションベースを傾けることにより、ユーザに擬似的な慣性力および擬似的な重力を体感させる。ここでは、ユーザの傾きは現実環境のユーザの傾きとは異なるが、没入型ディスプレイを用いて実写映像を提示することにより、ユーザは実験環境での現実世界に対する傾きが認識できなくなり、自らの重力から生成された力を慣性力として擬似的に体感する。なお、現実環境におけるユーザが体感する慣性力の方向および大きさは、加速度が発生する運動時に撮影された全方位動画画像を用いて推定する。以下に、各処理の詳細を述べる。

### 2.1 全方位動画画像を用いた加速度が発生する運動時における慣性力の算出

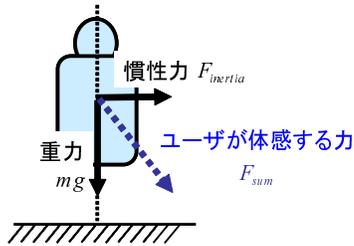
本節では、テレプレゼンスにおいて、ユーザに現実環境と同様の慣性力を与えるために、実環境における慣性力の方向および大きさを推定する手法を詳述する。慣性力は加速度が発生する運動時に加速度が働く方向とは逆方向に働く見かけ上の力であり、以下の式で表現される。

$$F_{inertia} = -ma, \quad (1)$$

ここで  $F_{inertia}$  は慣性力のベクトルを、 $m$  はユーザの質量を、 $a$  は移動車両の加速度のベクトルを表す。式(1)に示されるように、慣性力のベクトルは移動時の加速度ベクトルから算出を行う。本手法では、加速度が発生する運動時に撮影された全方位動画画像を用いて移動時のカメラの外部パラメータを推定することで、撮影時の動画画像の各フレームにおける加速度ベクトルを推定する。

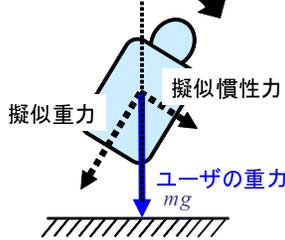
本研究では、カメラ外部パラメータの推定手法として全方位型マルチカメラで撮影された動画画像を用いる Sato ら [10] の手法を用いる。この手法は structure-from-motion 法 [9] に基づき、複数の投影中心を持つマルチカメラシステムに対応するように拡張した手法となっている。自然特徴点は Harris オペレータに

### 現実環境



(i) 現実環境においてユーザが体感する力

### モーションベース



(ii) テレプレゼンス環境においてユーザが体感する力

図2 慣性力の再現手法の概念図



図3 特徴点の追跡の様子

より追跡の容易な画像特徴を検出して特徴点の候補位置とし、ロバスト推定によって誤追跡を検出しながら自動的に追跡する。正確なカメラ外部パラメータを推定するために自然特徴点の候補は、特徴点の信頼度やテンプレート間の誤差などの複数の指標を用いて追加・削除を行い、自動的に追跡される。特徴点追跡の様子を図3に示す。ここでマルチカメラシステムの内部パラメータ（各カメラユニット間の位置・姿勢関係および各カメラユニットの内部パラメータ）は校正済みで既知とする。

推定されたカメラ外部パラメータからカメラの移動時の加速度の算出を行う。各フレームにおける3次元位置の変化量から移動速度の推定を行うが、このとき各カメラの3次元位置は、推定誤差と撮影時のカメラの高周波振動による影響を含んでおり、本研究で目的とする一定時間継続して働く慣性力の再現には不必要なため、これらの影響を取り除く必要がある。本手法では、移動速度を算出したいカメラ位置の前後数フレームにお

いて推定された移動速度を平均化した値を各フレームにおけるカメラの移動速度とすることで、この問題を解決する。これは、推定誤差と撮影時のカメラの高周波振動による影響がない場合には、速度が滑らかに変化するという仮定に基づいている。その後、推定された各フレームにおける速度ベクトルを微分することにより加速度ベクトルの算出を行う。以上のようにして推定された加速度ベクトルの逆方向に働く力として慣性力の大きさおよび方向の算出を行う。

### 2.2 モーションベースに与える傾きの算出

テレプレゼンスにおけるモーションベースの傾きは、現実環境においてユーザが体感する慣性力と重力の大きさおよび方向から算出する。本研究では、図2に示すように、前節で算出された慣性力およびユーザの重力の合力をテレプレゼンス環境におけるユーザの重力で代用する。ユーザが現実環境において体感する合力  $F_{sum}$  は、以下の式で表現される。

$$F_{sum} = F_{inertia} + mg, \quad (2)$$

ここで  $g$  は重力加速度のベクトルを表す。現実環境においてユーザが体感する慣性力と重力の合成ベクトル  $F_{sum}$  の方向とテレプレゼンス環境におけるユーザの重力方向を一致させることにより擬似的な慣性力をユーザに体感させる。ここでは、テレプレゼンス環境におけるユーザの重力は下方方向で一定の力であるため、ユーザの身体に対する合成ベクトルの方向が、現実環境とテレプレゼンス環境で同様になるようにモーションベースに傾きを与えることにより、ユーザが体感する力の方向を変化させる。現実環境においてユーザが体感する合力およびテレプレゼンス環境で慣性力の実現に用いるユーザの重力は、共にユーザの質量  $m$  のパラメータが含まれるため、実現されるモーションベースの傾きにユーザの質量は依存しない。

### 2.3 ユーザに提示する映像の生成

テレプレゼンスにおいて、ユーザに重力を用いて擬似的な慣性力を体感させるために、現実環境におけるユーザの傾きをユーザに認識させない必要がある。本研究では、ユーザに現実環境に対する傾きを認識させないために、映像提示用の装置として没入型のヘッドマウントディスプレイを用いる。

ユーザに提示する映像は、ユーザの体と提示映像の環境の位置関係を現実環境と同様にするために、提示映像をユーザの傾きに応じて変化させる必要がある。このときユーザには常に現実環境におけるユーザの視線画像と同様の映像を提示する必要があるが、これはヘッドマウントディスプレイにより実現可能である。全方位動画の一部を透視投影変換することによりユーザ視点画像を生成し、提示することが可能である。

## 3. テレプレゼンスシステムの構築

提案手法の有効性を示すために実写動画を用いて実験を行った。図1は没入型のディスプレイとしてヘッドマウントディスプレイ (Daeyang, i-visor FX601) と2軸の可動軸を持つモーションベース (Kawada Industries, JoyChair) を用いた試作テレプレゼンスシステムを示す。このモーションベースはロールとピッチの2軸の回転軸を持ち、それぞれの可動範囲は  $\pm 15$  度である。

このシステムでは全方位型マルチカメラシステム (Point Grey Research, Ladybug2) で撮影された全方位動画を入力として用いている。入力動画は、各カメラ 768×1024 の解像度を持つ映像を 30fps で取得した。

実験では、慣性力再現のための入力動画として、移動車両とジェットコースターに搭乗しながら撮影された全方位動画を用いた。以下、3.1節では、水平な地面を走行する車両から撮影された全方位動画を用いて減速・旋回など単純な運動時にユーザが体感する慣性力の再現結果を示し、3.2節では、提案手法の応用例として、ジェットコースターから撮影された全方位動画を用いて、ジェットコースターを擬似的に体験するテレプレゼンスシステムの構築し、走行時の慣性力の再現を示す。

### 3.1 移動車両から撮影された全方位動画を用いた慣性力の再現

#### 3.1.1 直線経路における減速時

車両が減速して停止した場合において、移動車両から撮影された全方位動画を用いてカメラ外部パラメータの推定を行った結果例を図4に示す。ここで、各四角錐はカメラの位置・姿勢を表し、移動車両が停止位置に近づくにしたがってカメラ間の距離が短くなる様子が分かる。このとき提案手法により実装されたピッチ軸に対するモーションベースの傾きを図5に示す。ここでピッチ軸に対する傾きは進行方向の傾きを示し、減速移動によりモーションベースが前方方向に傾くことにより慣性力を与えていることがわかる。また直線に近い経路を減速移動しているために、進行方向に対して垂直横方向の傾きを示すロール軸の傾きには大きな変化がなかった。

テレプレゼンス環境において再現された慣性力と目標とする現実環境における慣性力の比較結果を図6に示す。提案手法で再現される進行方向に対応する慣性力と現実環境における慣性力の差が最も大きいフレームでは、その差が  $0.068 \times \text{質量} \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$  となり現実環境における慣性力の絶対量の約4%であった。これにより提案手法で再現される慣性力と現実環境における慣性力に大きな違いがないことが分かる。また、モーションベースの傾きに応じた映像をヘッドマウントディスプレイに提示することにより、ユーザが減速時の進行方向に対して慣性力を体感できることを確認した。

#### 3.1.2 曲線経路における旋回時

曲線経路に対して車両が旋回して移動した場合に、移動車両から撮影された全方位動画を用いて慣性力の再現を行った。図7は推定されたカメラ外部パラメータを用いて描画したカメラパスである。推定されたカメラパスが左方向の大きく湾曲していることが分かる。テレプレゼンスにおいて提案手法により実装されたモーションベースの傾きを図8に示す。旋回時に回転中心に対して外向きに慣性力が働いているために、ロール軸に対して慣性力の大きさに比例してモーションベースが傾いていることが分かる。

テレプレゼンス環境において再現された慣性力と目標とする現実環境における慣性力の比較結果を図9に示す。旋回時においても減速時と同様に提案手法で再現される慣性力と現実環境における慣性力に大きな違いがないことが分かる。これは、

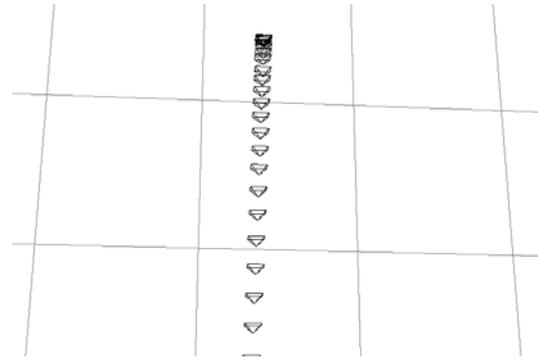
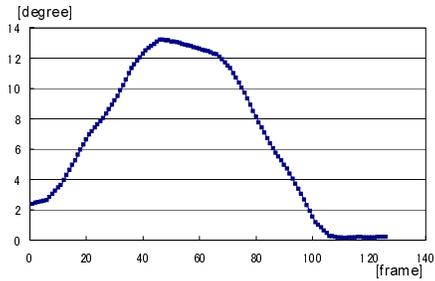
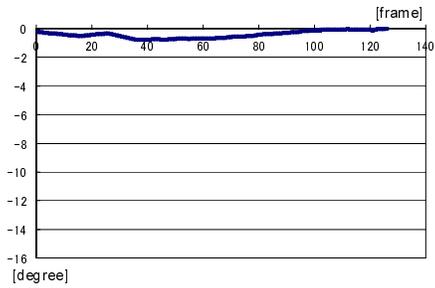


図4 カメラ外部パラメータの推定結果例（減速後停止）



(i) ピッチ軸に対するモーションベースの傾き



(ii) ロール軸に対するモーションベースの傾き

図5 推定されたモーションベースの傾き（減速後停止）

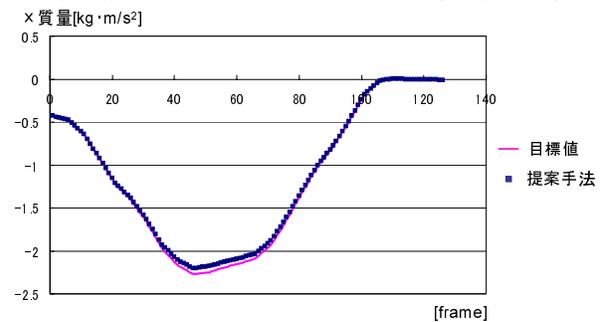


図6 進行方向に対する慣性力の再現結果（減速後停止）

車両が移動する地面が水平な場合に重力方向と慣性力の働く方向が垂直でほぼ一定角度となり、そのときに与えられる慣性力をテレプレゼンス環境において再現した場合に、モーションベースの可動範囲では再現可能な慣性力に大きな違いが得られなかったと考えられる。また、モーションベースの傾きに応じた映像をヘッドマウントディスプレイに提示することにより、ユーザが旋回時に回転中心に対して外向きに慣性力を体感できることを確認した。

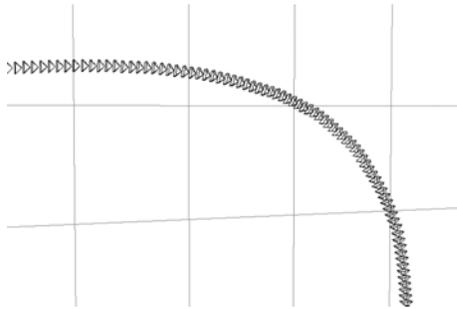
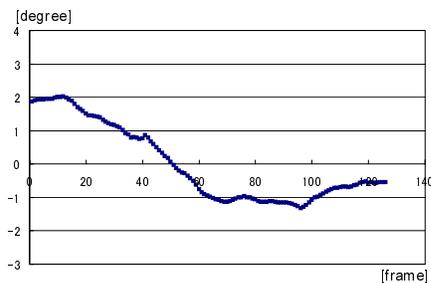
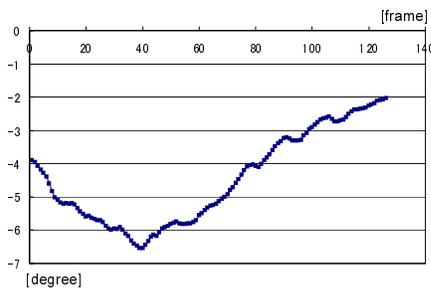


図7 カメラ外部パラメータの推定結果例（左旋回時）



(i) ピッチ軸に対するモーションベースの傾き



(ii) ロール軸に対するモーションベースの傾き

図8 推定されたモーションベースの傾き（左旋回時）



図9 進行方向に対して垂直横方向に対する慣性力の再現結果（左旋回時）

### 3.2 ジェットコースターに搭乗しながら撮影された全方位動画画像を用いた慣性力の再現

ジェットコースターに搭乗しながら撮影された全方位動画画像を用いて慣性力の再現を行った。ジェットコースターのような特殊な環境では、車体が地面に対して常に水平にはならないために、ユーザに働く慣性力と重力の方向ベクトルのなす角度が大きく変化する。撮影された全方位動画画像を用いて推定したカメラ外部パラメータから描画されたカメラパスの例を図10に

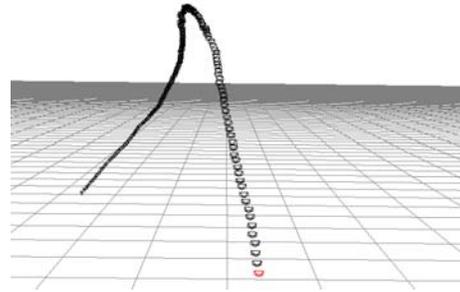
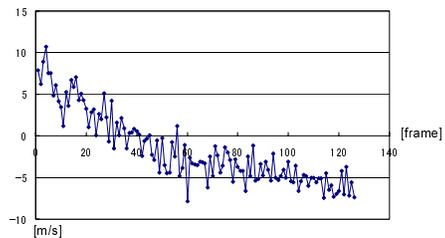
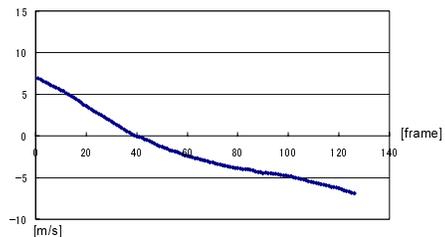


図10 カメラ外部パラメータの推定結果（ジェットコースター）



(i) 振動による影響あり

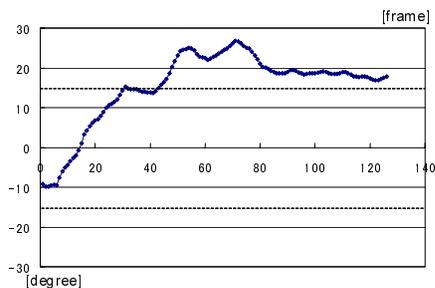


(ii) 振動による影響の除去結果

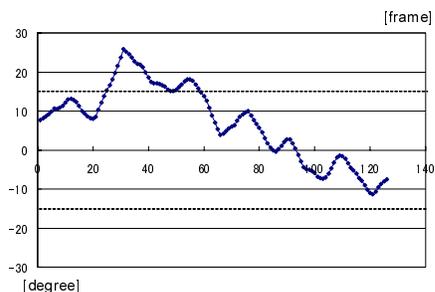
図11 推定されたジェットコースターの速度例（地面に対して垂直方向）

示す。図10からジェットコースターが一時上昇して、左に旋回しながら下降していく様子が見える。推定されたカメラ外部パラメータから算出したジェットコースターの地面に対して垂直方向の移動速度を図11に示す。図11(i)は各フレームごとに3次元位置の差分から算出したジェットコースターの速度であるが、カメラの高周波振動による影響のため、各フレーム間で急激に速度が変化している様子が見える。図11(ii)に提案手法により推定された速度の結果を示す。各フレームのジェットコースターの速度は、前後数フレームで算出された速度の平均から算出しているため、速度が滑らかに変化していることが分かる。

算出された各フレームにおける速度を微分することにより加速度を算出し、提案手法により推定されたモーションベースの傾きを図12に示す。ジェットコースターの昇降時に車体が地面に対して大きく傾く影響のため、ピッチ軸方向においてモーションベースの可動範囲の限界を超える問題が生じた。提案手法により再現される慣性力と目標とする現実環境における慣性力の比較結果を図13に示す。図13に示されるように、提案手法で再現される慣性力の大きさが現実環境の慣性力の大きさに比べて大きく異なる結果が生じた。これは、現実環境において



(i) ピッチ軸



(ii) ロール軸

図 12 推定されたモーションベースの傾き

ユーザが体感する慣性力と重力の方向ベクトルのなす角が鈍角になった場合に、合力の大きさがテレプレゼンス環境におけるユーザの重力に対して小さくなったためと考えられる。このように、現実環境においてユーザに働く慣性力と重力の方向ベクトルのなす角度が大きく変化する場合には、慣性力の大きさとモーションチェアの傾きが比例するとは限らない問題が発生する。

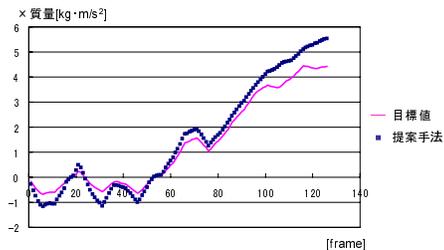
#### 4. まとめと今後の課題

本研究では、加速度が発生する運動時に体感する慣性力を2自由度のみのモーションベースを用いてユーザに体感させるテレプレゼンスシステムの構築を行った。本報告では、慣性力をモーションベースを傾けることによってユーザの重力から擬似的に生成する手法を示した。モーションベースによってユーザに与えられる慣性力の大きさは、移動車両で撮影された全方位動画からカメラ外部パラメータを推定することにより自動的に推定した。実験では、プロトタイプテレプレゼンスシステムを構築し、ユーザが提案手法により慣性力を擬似的に体感できることを確認した。今後の課題としてユーザの主観評価により提案手法の評価実験を行う必要がある。

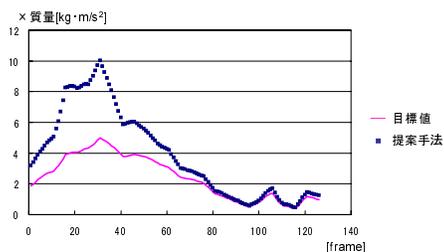
謝辞 本研究の一部は科学研究費補助金(基盤研究(A), No.19200016)および文部科学省 大学院教育改革支援プログラムによる。

#### 文 献

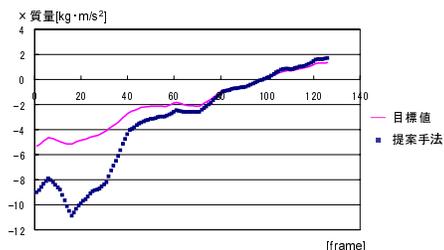
[1] S. Moezzi Ed.: Special Issue on Immersive Telepresence, IEEE MultiMedia, Vol. 4, No. 1, pp. 17–56, 1997.  
 [2] H. Tanahashi, K. Yamamoto, C. Wang and Y. Niwa: “Development of a Stereo Omni-directional Imaging System(SOS),” Proceedings of



(i) X 軸



(ii) Y 軸



(iii) Z 軸

図 13 実環境の慣性力と再現する慣性力との比較(ジェットコースター)

IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, pp. 289–294, 2000.

[3] S. Ikeda, T. Sato, M. Kanbara and N. Yokoya: “Immersive Telepresence System with a Locomotion Interface Using High-Resolution Omnidirectional Videos,” Proc. IAPR Conf. on Machine Vision Applications, pp. 602–605, 2005.  
 [4] R. R. Sperr: “Physics and Roller Coasters: The Blue Streak at Cedar Point,” American Journal of Physics, Vol. 59, Iss. 6, pp. 528–533, 1991.  
 [5] K. C. Cheok, J. L. Overholt and R. R. Beck: “Exact Methods for Determining the Kinematics of a Stewart Platform Using Additional Displacement Sensors,” Journal of Robotic systems, Vol. 10, Iss. 5, pp. 689–707, 1993.  
 [6] G. Lebret, K. Liu and F. L. Lewis: “Dynamic Analysis and Control of a Stewart Platform Manipulator,” Journal of Robotic systems, Vol. 10, Iss. 5, pp. 629–655, 1993.  
 [7] C. C. Nguyen, S. S. Antrazi, Z. L. Zhou and C. E. Campbell Jr: “Adaptive Control of a Stewart Platform-based Manipulator,” Journal of Robotic systems, Vol. 10, Iss. 5, pp. 657–687, 1993.  
 [8] Z. C. Shih, Y. S. Jaw and M. L. Hsu: “Virtual Roller Coaster,” Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2000 Conference, pp. 225–232, 2000.  
 [9] C. Tomasi and T. Kanade: “Shape and Motion from Image Streams under Orthography: A Factorization Method,” International Journal of Computer Vision, Vol. 9, No. 2, pp. 137–154, 1992.  
 [10] T. Sato, S. Ikeda and N. Yokoya: “Extrinsic Camera Parameter Recovery from Multiple Image Sequences Captured by an Omnidirectional Multi-camera System,” Proceedings of European Conference on Computer Vision, Vol. 2, pp. 326–340, 2004.