

# 視力触覚および前庭感の伝送による移動体の高度没入型 テレグジスタンスシステムの提案

早川達也<sup>†1</sup> 吉村大二郎<sup>†1</sup> 齊藤充行<sup>†1</sup> 小林康秀<sup>†1</sup> 脇田 航<sup>†1</sup>

**概要:** 近年、力覚情報を双方向に伝送可能なバイラテラル制御などの遠隔操作に関する研究が行われている。しかしながら、五感情報をインタラクティブかつ高臨場に伝送するまでは至っていない。そのため、操作者は移動体にかかる影響を考えながら遠隔操作を行うことはできない。そこで、本研究では移動体にかかる慣性や力覚、全周画像をリアルタイムに伝送し、HMD および 6 軸モーションベースを用いて高度に没入しながら遠隔操作が可能なテレグジスタンスシステムを提案する

**キーワード:** 6 軸モーションベース、前庭感覚、全周画像、テレグジスタンス、HMD、力触覚

## A Proposal of Advanced Immersive Telexistence System of the Moving Object by the transmission of Visuo-Haptic and Vestibular Sensation

TATSUYA HAYAKAWA<sup>†1</sup> DAIJIRO YOSHIMURA<sup>†1</sup>  
MITSUYUKI SAITO<sup>†1</sup> YASUhide KOBAYASHI<sup>†1</sup> WATARU WAKITA<sup>†1</sup>

**Abstract:** Currently, the remote control such as the bilateral control which enables transmitting the multimodal information has been studied. However, it is difficult to transmit the multimodal information interactively and realistically. Therefore, we propose a highly immersive telexistence system with HMD and six-axis motion base which enables transmitting the inertia and force information of mobile object, and 360-degree image of mobile object's surroundings at real-time.

**Keywords:** Six Axis Motion Base, Vestibular Sensation, 360-degree Image, Telexistence, HMD, Haptics

### 1. はじめに

現在、遠隔地にあるロボットを、自分の分身のように操作し、視覚や聴覚だけではなく触覚も伝達できるテレグジスタンスの研究が進められ、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<sup>(1)~(3)</sup>。また、より高臨場なテレグジスタンスを実現するため、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を用いて操作者に視覚情報を呈示する研究が行われている。現実環境を映像としてアーカイビングする代表的な手法の1つとして、全天球カメラで撮影した全方位映像を360°インタラクティブに再生する手法が挙げられる。しかしながら、記録された全周映像を再生するだけでは操作者にその場にいるかのような感覚を与えることは難しい。

一方、原子力施設や災害現場などの極限環境での作業を目的として、遠隔操作に関する研究が注目されており、視覚や力覚などの情報を双方向に伝送可能なバイラテラル制御の研究が行われている。これにより、遠隔操作で作業を行うときに反力や振動などの情報を操作者が感じながら微妙な手加減を行うことが可能になる。しかしながら、その場にいるような全周画像、慣性、力覚、前庭感覚といった

様々な情報をインタラクティブに伝送しながら遠隔操作をするまでは至っていない。そのため、操作者はその場に没入しながら遠隔操作を行うことはできない。

そこで本研究では、高度に没入可能なテレグジスタンスシステムを実現することによってこの問題の解決を試みる。具体的には、ロボットカーやドローンなどの移動体に全天球カメラを取り付けてリアルタイムに取得した全周映像を操作者に伝送し、HMDで360°インタラクティブに呈示可能にする。また、移動体に再帰性反射マーカを取り付けて赤外線カメラで追跡することで移動体の位置や慣性等をリアルタイムに推定し、推定した慣性力を6軸モーションベースを制御することによって操作者に力覚や前庭感覚として呈示する。これにより、操作者は移動体に実際に乗っているような感覚を得ることができ、乗り心地などの操作者に与える影響評価や操作者の操作感の向上が期待できる。

### 2. 関連研究

テレグジスタンスに関連する研究として、柏原らが肩乗り型のロボットを用いて、遠隔地にいる操縦者と現地の人とのスムーズなコミュニケーションを実現した<sup>(1)</sup>。しか

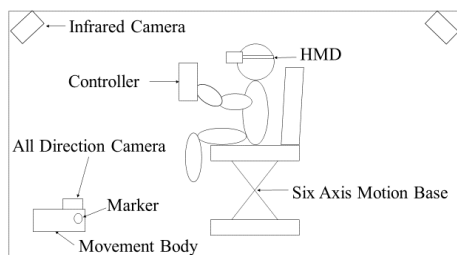
<sup>†1</sup> 広島市立大学  
Hiroshima City University

しながら、操縦者はパソコンの画面を見ながら遠隔操縦を行っており、その場に自分が存在しているような高い臨場感や没入感は得られない。また、堀らが記録された全方位の実写映像を HMD で再生すると共に、2 軸モーションベースを制御し前庭感覚を呈示して慣性力の再現をするシステムを構築した<sup>(2)</sup>。しかしながら、インタラクティブに遠隔操作をすることはできない。一方、廣多らがリアルタイムに視聴覚を得ることが可能なテレプレゼンタンスを実現している<sup>(3)</sup>。しかしながら、他地点のカメラからの映像を 360°インタラクティブに見渡すことはできない。また、視線とカメラの動きを連動させて映像を伝送するには、カメラの向きの制御が必要となり、操作者の頭部動作にリアルタイムに追従させることは困難である。また、外力や加減速、遠心力、力触覚を感じることもできない。そのため、実際にその場に行き、動いているような感覚を得ることができない。また、Fernando らがリアルタイムに視力触覚および聴覚を得ることが可能なテレプレゼンタンスを実現している<sup>(4)</sup>。しかしながら、前庭感覚を感じることはできないため、移動体にかかる風や重力、慣性力などの外力が移動体に与える影響を考察することはできない。

この点、本研究では操作する移動体の視力触覚だけでなく、前庭感覚および全周映像をリアルタイムに操作者に呈示することで、移動体に与える影響を考察することができたり、従来の研究よりも高い臨場感を得ることができるテレプレゼンタンスシステムを実現することを目指す。

### 3. 提案システム

図 1(a)に提案システムの概要を示す。操作者は再帰性反射マーカと全天球カメラを取りつけた移動体をコントローラで制御する。移動体がラジコンカーであればハンドルコントローラを用いて現実の車の運転操作に近づける。



(a) システム概要図



(b) 呈示する画像

図 1 提案システムの概要

Figure 1 Overview of a proposal system.

全天球カメラで取得した映像をリアルタイムに操作側に伝送し、VR 空間で全天球映像化することで操作者は HMD で 360°インタラクティブに周囲の映像を見渡すことができる。また、移動体に取り付けた再帰性反射マーカを赤外線カメラで追跡することで移動体の位置や姿勢をリアルタイムに取得し、加速度や速度を求めて 6 軸モーションベースを制御することで操作者に力覚や前庭感覚を呈示する。

図 2 にカメラから取得した全天球映像をインタラクティブに HMD に呈示するためのフローチャートを示す。

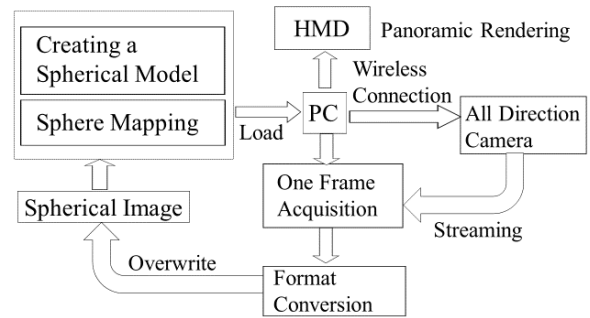


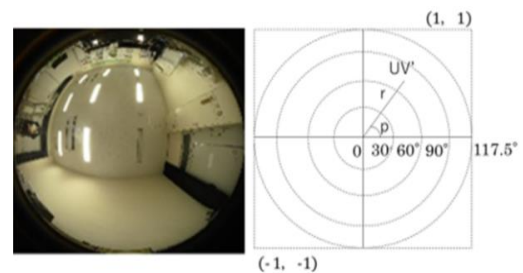
図 2 全天球映像呈示の流れ

Figure 2 Flow of 360-degree video presentation.

まず、PC と全天球カメラを無線で接続する。次に、カメラから取得した全周映像から 1 フレーム分の画像を取得し、得られた全周画像を 3 次元球体モデルに対応付け可能なフォーマットに変換する。全周画像は 3 次元球体モデルにあらかじめスフィアマッピングしておくことで、3 次元モデル化しておく。カメラから取得した全周画像を毎フレーム切り換えることによって、HMD で全周画像を任意の方向でインタラクティブに見渡すことが可能となる。

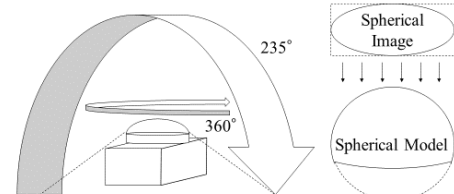
#### 3.1 全周画像を用いた 3 次元全天球モデルの作成

簡単のため、図 3(a)のような全周画像の中心点を(0,0)、左下を(-1,-1)、右上が(1,1)となる座標系で考える(図 3(b))。



(a) 全周画像

(b) マッピング方式



(c) 使用する全天球カメラ

(d) 3次元モデル

図 3 3次元全天球モデルの作成

Figure 3 Creating of 3D spherical model.

本研究で用いる全天球カメラは、水平方向 360°、垂直方向 235°まで撮影することが可能である (図 3(c))。そのため、3次元球体モデルにマッピングする全周画像の投影点の半径  $r$  は北極点からの緯度差を 117.5 で割ることで 0~1 と表す。図 4 にワールド座標系における点  $P = (P_x, P_y, P_z)$  における経度  $p$  と緯度  $\varphi$  を示す。

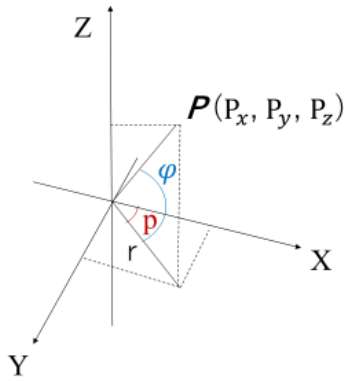


図 4 緯度、経度の算出

Figure 4 Calculation of latitude and longitude.

経度  $p$ 、緯度  $\varphi$  は以下の計算で求められる。

$$p = \cos^{-1} \frac{x}{r} = \cos^{-1} \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\varphi = \cos^{-1} \frac{r}{|P|} = \cos^{-1} \frac{\sqrt{x^2+y^2}}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \dots\dots\dots (2)$$

$P$  の XY 座標系上での投影点  $UV'$  は以下の式で求められる。

$$UV' = (\cos(p), \sin(p)) * r \dots\dots\dots (3)$$

この座標系に 1 足して 2 で割ることで、左下が (0, 0)、右上が (1, 1) となる通常のテクスチャ座標系に変換する。これにより、本研究で使用する全天球カメラの全周画像を VR 空間内の 3次元モデルに対応付けできる。また、カメラで取得した画像を毎フレーム更新し、3次元モデルの内側から任意の方向への立体視を行うことにより、図 1 (b) のように全天球カメラからの全周画像を HMD でインタラクティブに見渡すことが可能となる (図 5)。



図 5 HMD によるインタラクティブ全周映像

Figure 5 Interactive 360-degree video with HMD.

### 3.2 6軸モーションベースによる前庭感覚の呈示

6軸モーションベースの入力に必要な情報を得るため、本研究では光学式モーションキャプチャを用い、移動体の位置、姿勢を検知するため、3点以上のマーカを移動体に取り付ける。また、移動体がラジコンカーであればタイヤのそれぞれとボディにマーカを取り付けるなど、移動体の特性に応じてマーカを取り付ける。マーカの位置情報をカメラ(更新周波数 120Hz)で追跡することで、移動体の位置座標  $P_i(t_x, t_y, t_z)$  および 3 軸の回転角  $\theta_i(\alpha, \beta, \gamma)$  を取得し、移動体の姿勢や加速度等を計算し、6軸モーションベースを制御することで操作者に慣性力を呈示する。

6軸モーションベースの座席に座っている操作者を傾斜させることで慣性力を呈示するためには、ワールド空間上での移動体の加速度をローカル座標系へ変換する必要がある (図 6)。

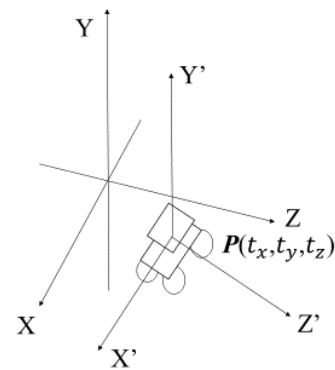


図 6 ローカル座標の算出

Figure 6 Calculation of the local coordinates.

そこで、アフィン変換を用いて移動体のローカル座標 ( $X', Y', Z'$ ) を以下の式によって算出する。

$$X' = \text{Mat} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, Y' = \text{Mat} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, Z' = \text{Mat} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{Mat} = T \times R_x \times R_y \times R_z \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $T$  は平行移動、 $R_x$  は X 軸周りの回転、 $R_y$  は Y 軸周りの回転、 $R_z$  は Z 軸周りの回転を表す。

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

$$R_y = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

$$R_z = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

ワールド空間における移動体の速度  $V_i$ [m/s] および加速度  $a_i$ [m/s<sup>2</sup>] は以下の式で求められる。

$$V_i = \frac{P_i - P_{i-1}}{\Delta t} = 120 * (P_i - P_{i-1}) \dots\dots\dots (10)$$

$$a_i = \frac{V_i - V_{i-1}}{\Delta t} = 120 * (V_i - V_{i-1}) \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 $\Delta t$  は刻み時間を表す。

ローカル座標における移動体の加速度  $a_{li}$  は以下の式で求められる。

$$a_{li} = Mat \times a_i \dots\dots\dots (12)$$

移動体にかかる慣性力は以下の式で求められる。

$$F_{ine} = -m_1 a_{li} \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 $m_1$  は移動体の質量[kg]、 $a_{li}$  はローカル座標における移動体の加速度を表す。

本研究では、操作者に呈示する慣性力はモーションベースを傾斜させることで表現する。このときの傾斜角は、現実環境において操作者が体感する移動体の慣性力と重力の大きさ・方向より求められる。操作者が現実環境で体感する力  $F_{sum} (= \{F_x, F_y, F_z\})$  は以下の式で求められる。

$$F_{sum} = F_{ine} + m_2 g \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 $m_2$  は操作者の質量[kg]、 $g$ [m/s<sup>2</sup>] は重力加速度を表す。

図 7 に操作者座標系における合成ベクトル  $F_{sum}$  からモーションベースの傾斜角[deg]を示す。

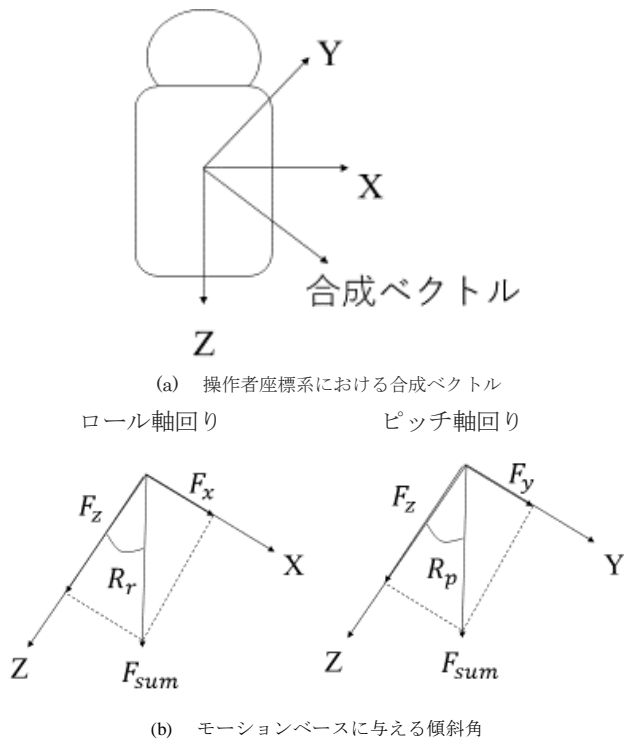


図 7 モーションベースの傾斜角の算出

Figure 7 Calculation of the inclination angle of the motion base.

モーションベースのロール軸の傾斜角  $R_r$  およびピッチ軸の傾斜角  $R_p$  はそれぞれ以下の式で求められる。

$$R_r = \arctan\left(\frac{F_x}{F_z}\right) \dots\dots\dots (15)$$

$$R_p = \arctan\left(\frac{F_y}{F_z}\right) \dots\dots\dots (16)$$

図 8 に本研究で用いる 6 軸モーションベースを示す。座席を傾斜させることで慣性力を表現するが、可動範囲に限界があるため、次の動作に備えて徐々に初期位置に戻す必要がある。



図 8 6 軸モーションベース  
Figure 8 Six axis motion base.

#### 4. 実験結果

図 9 に実験環境を示す。移動体にはラジコン(1/10RC トヨタ ランドクルーザー 40)を用い、全天球カメラ(Kodac PIXPRO SP360 4K)および再帰性反射マークを取り付けた。全天球カメラから伝送される全周映像を HMD (Oculus Rift DK2)を介してリアルタイムに映像を操作者に伝送し、移動体周りに設置した 12 台の赤外線カメラでマークを追跡することで移動体の位置座標および 3 軸回転角を取得し、加速度を算出し、6 軸モーションベースを傾かせることで操作者に慣性力を呈示する。



図 9 実験環境

Figure 9 Experimental environment.

図 10 に示すように移動体のモーションキャプチャデータから位置や加速度を推定し、6 軸モーションベースを制御することが可能となった。





図 10 6 軸モーションベースの制御  
Figure 10 Control of six axis motion base.

また、図 11 に示すように、移動体の全周映像をインタラクティブに見渡しながら遠隔操作することが可能となった。これにより、他の感覚を組み合わせることでその場にいるような感覚を得ながら遠隔操作を行うことが期待できる。これについては今後の課題である。また、今回実装したシステムでは、Kodac PIXPRO SP360 4K との通信が切断されてしまう問題がある。また、今回使用したコントローラでは車を操作した感覚を得ることは難しいため、通信環境の改善やハンドルコントローラでの制御も今後の課題として挙げられる。



図 11 HMD によるインタラクティブ全周映像呈示  
Figure 11 Interactive 360-degree video rendering with HMD.

## 5. まとめ

本研究では、移動体に全天球カメラを取り付けてリアルタイムに取得した全周映像を操作者に伝送し、HMDで360°インタラクティブに呈示可能にした。また、移動体に再帰性反射マークを取り付けて赤外線カメラで追跡することで移動体の位置や慣性力等をリアルタイムに推定し、推定した慣性力を6軸モーションベースを制御することによって操作者に力覚や前庭感覚として呈示することにより、操作者は移動体に実際に乗っているかのような感覚を得ることが可能なレイグジスタンスシステムを提案した。現状、移動体のモーションキャプチャデータから位置や加速度を推定し、6軸モーションベースを制御し、前庭感覚を呈示することと移動体に取り付けた全天球カメラで取得した全周映像をHMDで360°インタラクティブに呈示することを実現している。今後の課題として、遠心力の呈示および評価実験、ハンドルコントローラでの移動体の制御などが挙げられる。

## 参考文献

[1] 柏原忠和, 大澤博隆, 篠沢一彦, 今井倫太. 遠隔コミュニケーションのための肩乗りアバタの提案. 2011, インタラクシオン, pp.473-473.

- [2] 堀 磨伊也, 神原誠之, 横矢直和. 低自由度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によるテレプレゼンスシステムの構築. 2011, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.16, no.2, pp.283-292.
- [3] 廣多 馨, Yamen Saraiji, Charith Fernando, 古川正紘, 南澤孝太, 舘 暉. 複数のスレーブロボットを用いた広域分散型レイグジスタンスの試作. 2012, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, vol.72, no.17, pp.485-486.
- [4] C. L. Fernando, M. Furukawa, T. Kurogi, K. Hirota, S. Kamuro, K.Sato, K.Minamizawa and S. Tachi. TELESAR V. TELExistence Surrogate Anthropomorphic Robot, 2012, SIGGRAPH 2012, Los Angeles, California, August 5 - 9, 2012. ISBN 978-1-4503-1435-0/12/0008