

3 自由度モーションベースの制御とカヌー競技への応用

松林勝志^{†1} 山下晃弘^{†1} 富平準喜^{†2} 佐藤悠之輔^{†3}
瀧島和則^{†1} 本間朗^{†4} 吉川千里^{†2}

概要 : 3 自由度モーションベースと VR ゴーグルを用いた新しいスポーツ観戦システム「シンクロアスリート」を報告する。電気モータでモーションベースを駆動しており、一般的な油圧シリンダを使ったものと比較し、非常に小型軽量である。シンクロアスリートの搭乗者は 360° 映像・音声・動きにより、まるで選手になったかのような臨場感溢れる体験ができる。3 自由度モーションベースの制御方法とカヌーラローム競技への応用について報告する。

キーワード : スポーツ観戦システム, モーションベース, バーチャルリアリティ, カヌー

Control of Motion Base with Three DOF and Application to Canoe Slalom

Katsushi MATSUBAYASHI^{†1} Akihiro YAMASHITA^{†1} Toshiki TOMIHIRA^{†2}
Yunosuke SATO^{†3} Kazunori TAKISHIMA^{†1} Akira HOMMA^{†4}
Senri YOSHIKAWA^{†2}

Abstract. A new sports watching system we call "Synchro-athlete", is developed with a three DOF motion base and a VR goggle in this research. This motion base is driven by electric motors and is very small and lightweight. Synchro-athlete provides 360-degree video, sound and motion as if you are the player. Control of three DOF motion base and the application to canoe slalom are described in this paper.

Keywords: Sports watching system, Motion base, Virtual reality, Canoe

1. はじめに

スポーツ観戦はスタジアムでの観戦か、テレビやネット中継で楽しむのが一般的である。しかしこれらのシステムでは基本的に定位置からの観戦しかできず、選手の動きを体感することもできない。映像と共に動きを楽しめるシステムとしては、CJ 4DPLEX 社の 4DX[1]や MediaMation 社の MX4D[2]があり、映画館への導入[3][4]が進んでいる。しかしこれらのシステムは映画での再生専用であり、あらかじめ決められた比較的単純な動作となっている他、コンテンツ制作における動きのデータは俳優の動きそのものを取り込んでいない。つまり特定のパターンの動きのデータを後からタイミングを合わせて挿入しているため、実際の俳優の映像上の動きに対する椅子の動作に、違和感を覚えることも多い。さらに映像は 3D ではあるものの 360° 映像ではないことに加え、リアルタイムに映像と動きを再現することはできない。

360° 映像と動きを体験できるシステムは、CG を用いた

ゲーム機やフライトシミュレータ、ドライブシミュレータ等で研究・実用化されているが、360° 実写映像を用いかつ、今まさにプレイしている選手の選手目線での「映像・音声・動き」をリアルタイムに再生できるシステムの開発・実用化は、ほぼ例がない。

フライトシミュレータやドライブシミュレータでは、Stewart platform[5]と呼ばれる 6 自由度のモーションベースがよく利用されている[6][7]。しかしこのモーションベースは機器が大型かつ油圧を使うなど装置が大がかりで、価格も高価である。また可搬性に乏しく、汎用的に用いることが難しい。そこで、モータ駆動で小型軽量の 3 自由度モーションベースと VR ゴーグルを用いて、自分が選手として今まさに他の選手と共に競技に参加しているかのような選手目線での臨場感あふれる「映像・音声・動き」を提供する、スポーツ観戦システム（以下、シンクロアスリート）の開発を行った。シンクロアスリートでは、あらかじめ記録しておいた「映像・音声・動き」を再生するリプレイモードの他、今まさにプレイしている選手の選手目線の「映像・音声・動き」を配信・再生するリアルタイムモードも実装している。

例えばマラソン競技においてペースメーカーにカメラ等の装置を携帯してもらえば、観戦者はペースメーカーの走る動きを体験すると共に、横や後ろを走る選手の表情を見たり、足音や息づかいまで感じたりすることができる。

^{†1} 東京工業高等専門学校
National Institute of Technology, Tokyo College
^{†2} 筑波大学
University of Tsukuba
^{†3} 豊橋技術科学大学
Toyohashi University of Technology
^{†4} 東京農工大学
Tokyo University of Agriculture and Technology

野球のキャッチャーに応用すれば 150 キロの剛速球を受けるといった、臨場感溢れる体験が可能となる。カヌー等乗り物に取り付ける場合は、選手が操縦する乗り物にタンデムで一緒に搭乗しているかのような体験ができる。

本システムは Stewart platform と比較して、油圧を使わないこと、またスマートフォンをセンサとして利用することなどから、可搬性・経済性に優れている。しかしモーションベースの自由度が少ないことから、転回運動（ヨー）が再現できない。しかし転回運動については、映像の移動方向とは逆方向に移動感覚が引き起こされるベクション[8]と呼ばれる効果により、擬似的に感じさせることができるため[9]、あえて3自由度で開発を行った。

本論文では、開発したシンクロアスリートについて報告する他、基礎的な性能評価結果及び、本システムをカヌー・スラローム競技に応用し、実際に観戦システムとして適用した場合の評価結果について報告する。

2. システム概要

シンクロアスリートのハードウェア・ソフトウェア一覧を表1に示す。また観戦者側システム、選手側システムの構成を図1、図2に示す。図1の6画面ディスプレイは搭乗者だけでなく、周囲で搭乗を待つ人も映像を楽しめるよう配置した。図2はカヌー・スラローム競技に適用した構成である。

カヌーに適用するにあたり、全天球カメラやセンサとして使用するスマートフォンの位置について、選手とシンクロするという意味から、選手に取り付けるべきという意見もあった。しかしマラソンやキャッチャー等と異なり、選手が常に激しく動くことから、VRゴーグルの映像も激しく揺れ、気分が悪くなることが予想されたため、カヌーにカメラとスマートフォンを固定した。つまりカヌーにタンデムで同乗しているかのような体験ができることになる。

コンテンツは2種類の提供方法があり、一つはあらかじめ選手目線での映像・音声・動きを記録しておき、後から再生するリプレイモード、もう一つは今まさに競技している選手の映像・音声・動きを時間差ほぼ無し（タイムラグはインターネット通信環境に依存）で、楽しむことができるリアルタイムモードでの提供である。

3. モーションベースの仕様と構造

設計・開発したモーションベースの主な仕様を表2に、構造及び各部の名称を図3に示す。最上部のエンドプレートには、椅子（バケットシート等）を取り付ける（図1）。3つの回転ジョイントをリニアアクチュエータで上下させることで、エンドプレートを上下・ロール・ピッチ運動させることが可能である。リニアアクチュエータは、垂直に立てられた台形ねじをモータで回転させ、回転ジョイントが取り付けられた台形ねじナットを上下させることで実現

している。

台形ねじにバネがはめられているのは搭乗者の体重を支え、重力の影響を打ち消し、モータの負荷を純粋に、荷重×加速度、にするためである。このバネがないと上げる時と下げる時で、負荷に極めて大きな差ができ、不自然な動きになってしまう。

表1 ハードウェア・ソフトウェア構成

Table 1 Configurations of hardware and software

リプレイモード データ 取得	再生	リアル タイム モード	ハードウェア	ソフトウェア
	○	○	3自由度モーションシミュレータ	リアルタイムモード・リプレイ モード映像再生・モーションシ ミュレータ制御ソフトウェア (Windows10, Unity)
	○	○	モーションシミュレータコント ローラ（電源、モータ制御回路）	
	○	○	パソコン・スピーカ	
	○	○	6画面ディスプレイ (4K, 40インチ)	
	○	○	スマートフォン (Google Nexus 5) ヘッドマウントVRケース	リアルタイムモード・リプレイ モード映像再生ソフトウェア (3Dビューワ、Android)
	○	○	無線LAN機器	
○		○	360°カメラ (RICOH Theta S)	ストリーミングサーバソフトウェ ア
		○	ストリーミングサーバ (Raspberry Pi)	
○		○	スマートフォン (Google Nexus 5, 加速度セン サとして使用)	3軸加速度計測ソフトウェア

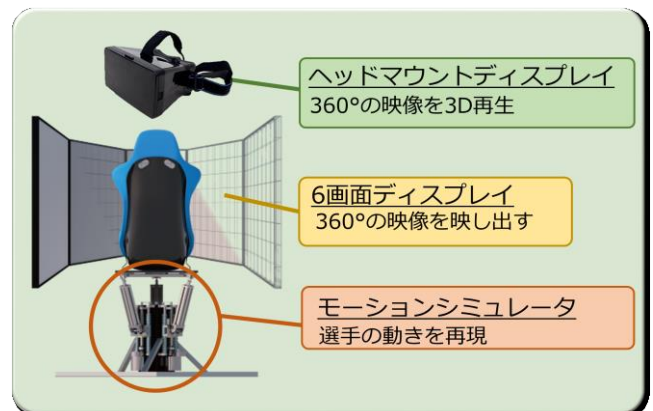


図1 観戦者側システム構成

Figure 1 Configuration of the system for spectators



図2 選手側システム構成

Figure 2 Configuration of the system for players

表 2 開発したモーションベースの仕様

Table 2 Specification of the developed motion base

項目	仕様
構造	3軸（鉛直方向並進，ロール，ピッチ）パラレルリンクモーションベース
動力	電動自転車用36V350WDCブラシモータ MY1016Z3
積載重量	搭乗者・付属品を含めて100kg
外形寸法（最小）	（縦,横,高）≒（920mm, 1100mm, 650mm）
ストローク（最大）	100mm
最大傾斜角	ピッチ角 $\theta \approx 16.4\text{deg}$, ロール角 $\phi \approx 13.5\text{deg}$

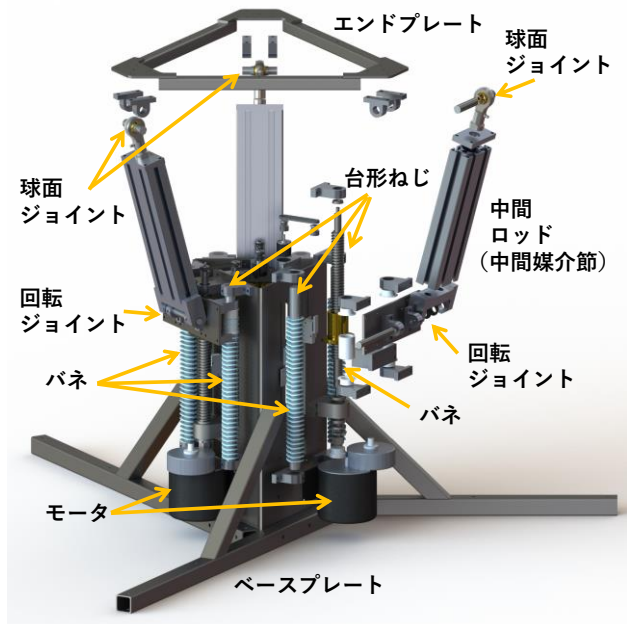


図 3 モーションベースの構造
 Figure 3 Structure of the motion base

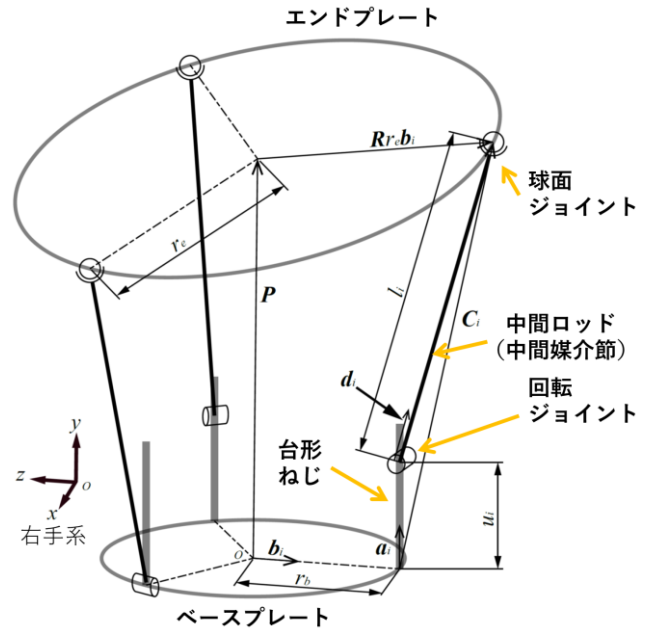


図 4 モーションベースのリンク構造
 Figure 4 Linkage mechanism of the motion base

表 3 図 4 のパラメータ

Table 3 Parameters in Fig.4

- P エンドプレート中心位置ベクトル
- R エンドプレートの姿勢を表す回転行列
- C_i 台形ねじの根元から球面ジョイントへのベクトル
- r_e エンドプレート半径（スカラ）
- r_b ベースプレート半径（スカラ）
- l_i 中間ロッド（中間媒介節）の長さ（スカラ）
- u_i リニアアクチュエータの変位（スカラ）
- a_i 台形ねじ下部から y 方向への単位ベクトル
- b_i 原点 o から台形ねじ下部への単位ベクトル
- d_i 回転ジョイントから球面ジョイントへの単位ベクトル
- o 原点（ベースプレート中心）
- i リニアアクチュエータの番号 ($i = 1, 2, 3$)

4. モーションベースの制御

4.1 逆運動学によるアクチュエータの変位置

モーションベースのリンク構造を図 4 に、図中のパラメータを表 3 に示す。エンドプレートの位置及び姿勢から、リニアアクチュエータの変位 u_i を逆運動学で求める[10].

回転行列 R は、

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

で与えられる。ここで θ, ϕ, ψ は、 x, y, z 軸を中心に原点 o から見たエンドプレートの回転角（ピッチ，ヨー，ロール）である。

図 4 より、

$$P + R \cdot r_e \cdot b_i = r_b \cdot b_i + u_i \cdot a_i + l_i \cdot d_i \quad (2)$$

であるので、

$$P + R \cdot r_e \cdot b_i - r_b \cdot b_i = u_i \cdot a_i + l_i \cdot d_i \quad (3)$$

となる。左辺について、

$$C_i = P + R \cdot r_e \cdot b_i - r_b \cdot b_i \quad (4)$$

とおくと、(3)式は、

$$C_i = u_i \cdot a_i + l_i \cdot d_i \quad (5)$$

となる。(5)式の右辺第一項を左辺へ移項し、両辺の左からそれぞれの転置をかけると、

$$(C_i - u_i \cdot a_i)^T (C_i - u_i \cdot a_i) = (l_i \cdot d_i)^T (l_i \cdot d_i) \quad (6)$$

となり、変形すると次式を得る。

$$u_i^2 - 2C_i^T \cdot a_i \cdot u_i + C_i^T \cdot C_i - l_i^2 = 0$$

(7)
2次方程式の解の公式より, u_i は

$$u_i = C_i^T \cdot a_i \pm \sqrt{(C_i^T \cdot a_i)^2 - C_i^T \cdot C_i + l_i^2} \quad (8)$$

となる. ここで図4に示すように, エンドプレートがベースプレートより上にあるため, (8)式の符号はマイナスとなる. よって次式となる.

$$u_i = C_i^T \cdot a_i - \sqrt{(C_i^T \cdot a_i)^2 - C_i^T \cdot C_i + l_i^2} \quad (9)$$

本研究で開発したモーションベースでは, θ , w 及びエンドプレートのy軸方向変位 p_y しか変化しないため, P の初期位置のy座標の値を p_0 とすると,

$$\phi = 0, \quad P = (0, p_0 + p_y, 0)^T \quad (10)$$

となり, リニアアクチュエータは, 120° 毎に配置しているため, b_i は, 次式となる.

$$b_1 = [0, 0, -1]^T$$

$$b_2 = \left[-\frac{\sqrt{3}}{2}, 0, \frac{1}{2} \right]^T \quad (11)$$

$$b_3 = \left[\frac{\sqrt{3}}{2}, 0, \frac{1}{2} \right]^T$$

ここで, a_i は i によらず, すべて同じであり,
 $a_i = [0, 1, 0]^T$ (12)
である.

開発したモーションベースのリンクの寸法を表4に示す.

表4 各リンクの寸法値
Table 4 Each length of the links

r_e	245 mm
r_b	150 mm
l_i	355 mm

4.2 選手の動きの再現

選手あるいはシンクロアスリートの搭乗者の座標系を図5(a)に示す. スマートフォンを縦にし液晶を体側に向け, 胸ポケット等に入れて選手の動きを測定するため, スマートフォンの座標軸に合わせy軸を上方向としている. z方向が, 選手・搭乗者が向いている方向となる.

今, 計測される加速度は重力加速度 G だけであると仮定する. 各軸方向の加速度ベクトルを X_{acc} , Y_{acc} , Z_{acc} とすると, 図5(b)よりz軸, x軸での回転角は, 次式となる.

$$\begin{aligned} \angle z &= \tan^{-1} \frac{Y_{acc}}{X_{acc}} \\ \angle x &= \tan^{-1} \frac{Y_{acc}}{Z_{acc}} \end{aligned} \quad (13)$$

実際には, スマートフォンのセンサにより測定される各軸の加速度ベクトル X_{sensor} , Y_{sensor} , Z_{sensor} は G 以外の別の加速度が加わっている. その加速度と G の合成ベクトルを

A_{comp} とする (図5(c), 別の加速度としてx軸方向の加速度 X_{sensor} のみが作用している例). A_{comp} が鉛直になるよう傾け, G との差分をエンドプレートのy軸方向の運動ベクトル A_{endp} により補正を行うことで, 搭乗者は A_{comp} を体感できる (図5(d)).

この時の, A_{endp} の大きさ, $|A_{endp}|$ は, 次式となる.

$$|A_{endp}| = \sqrt{|X_{sensor}|^2 + |Y_{sensor}|^2 + |Z_{sensor}|^2 - |G|} \quad (14)$$

であり, 図5(d)の場合, エンドプレートを上方向に運動させることで A_{endp} を発生させる.

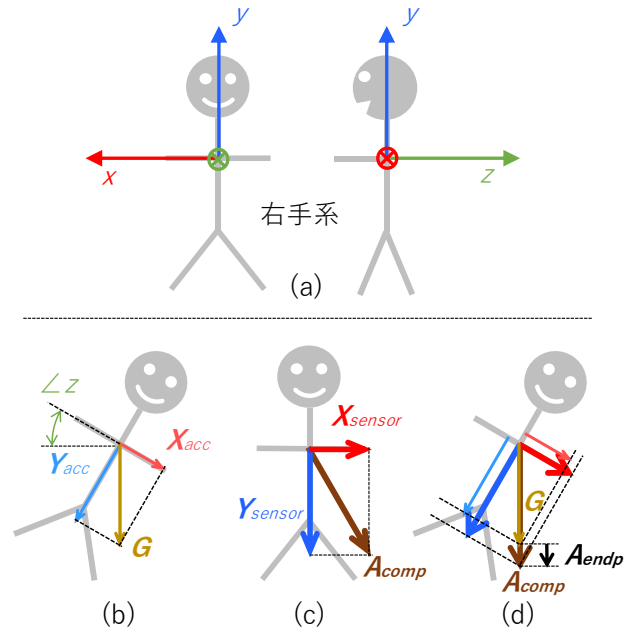


図5 モーションベースの制御方法
Figure 5 Control method of the motion base

4.3 PCからモーションベースコントローラへの指示

モーションベースの駆動において, 機械的な可動範囲を超える動作, つまりオーバーランは阻止しなければならない. 安全のため, 各リニアアクチュエータにはリミットスイッチを備え, 可動範囲を超える動作は強制的に停止する機能を備えているが, 常にその可動範囲の中央付近で動作するようにPCからモーションベースコントローラ (以下, コントローラ) に指示を送る.

モーションベースの各リニアアクチュエータの台形ねじには, 位置 (原点からの変位) を測定するためのロータリーエンコーダが取り付けられている. スマートフォンで測定された加速度データから, 各リニアアクチュエータの目標位置を計算し, コントローラに送信する手順を以下に示す.

- 1) スマートフォンから得た3軸の加速度データそれぞれをモータの動特性を考慮しIIRローパスフィルタ (カット

トオフ周波数約 6.5Hz) で高周波成分をカットする。

- 2) 式(14)で $|A_{endp}|$ を計算し 2 回積分してエンドプレート
 を平行移動させる変位 p を計算する。
- 3) p にエンドプレート中心の初期高さを加算したものを図
 4 の P の高さとする。
- 4) 式(9)で各リニアアクチュエータの目標位置を計算する。
- 5) スマートフォンから得た加速度データは、サンプリング
 周期が一定ではない離散データのため、1/100 秒毎の目標
 位置を線形補間により計算する。

2)の積分は、次式で計算する。

$$v = \int (|A_{endp}| - K \cdot p - A \cdot v) dt$$

$$p = \int v dt \quad (15)$$

ここで、 p, v は各リニアアクチュエータの位置、速度(初
 期値ゼロ)、 K, A は定数であり、 $(-K \cdot p - A \cdot v)$ は、可動
 範囲の中心付近で動作を安定させる補正項である。 K, A の
 値は共に 1.0 を使用しているが、この値は、アクチュエー
 タの動きをシミュレートするソフトウェアを開発し、実験
 的に決定した。

4.4 コントローラによるモーションベースのモータ制御

コントローラは、PC から 3 軸それぞれの位置の目標値 (単
 位 edge, 後述) を受信する。搭乗者の保護とモータ駆動回
 路の過負荷を避けるため、速度制限を行った上で、PID 制
 御によりリニアアクチュエータのモータを駆動する (図
 6)。フィードバック制御は 1kHz のタイマー割り込みで処
 理され、コントローラとモーションベース間だけで完結し
 ている。比例、積分、微分要素の比例定数 K_p, K_i, K_d はモ
 ーションベースの動きを観察しながら調整を行い、順に
 0.8, 0.0008, 40 としている。

使用するロータリーエンコーダの分解能は、100 ppr で
 あり、これを 4 通倍して使用している。そのためカウント
 されるのは出力パルスのエッジ数となる。台形ねじのピッ
 チは 5mm であることから、次のように単位 edge を定義す
 る。ロータリーエンコーダの分解能は 400 edge/r となる。
 すなわち、

$$1 \text{ edge} = 0.0125 \text{ mm} \quad (1 \text{ mm} = 80 \text{ edge})$$

ある時刻 $n[\text{ms}]$ の時の目標値を $x_n[\text{edge}]$ 、最大速度を v
 $[\text{edge}/\text{ms}]$ とすると、速度制限後の目標値 $y_n[\text{edge}]$ は、次
 の式で表される。

$$y_n = \begin{cases} y_{n-1} + v & (x_n - y_{n-1} > v) \\ x_n & (|x_n - y_{n-1}| \leq v) \\ y_{n-1} - v & (x_n - y_{n-1} < -v) \end{cases} \quad (16)$$

速度制限は 1edge/ms (12.5mm/s) の整数倍で設定でき、
 現在 3 又は 4edge/ms を標準設定として運用している。
 3edge/ms の速度制限で 1s 後に速度制限に到達し、2s 後に
 折り返す等加速度の目標値を想定した場合の速度制限の様

子を図 7 に示す。

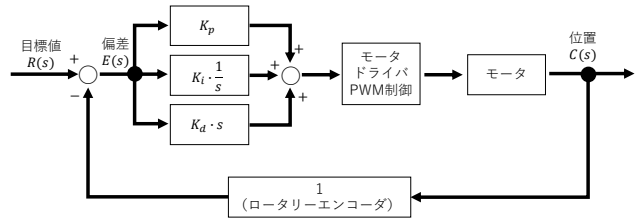


図 6 PID によるモータ制御

Figure 6 Motor control using PID

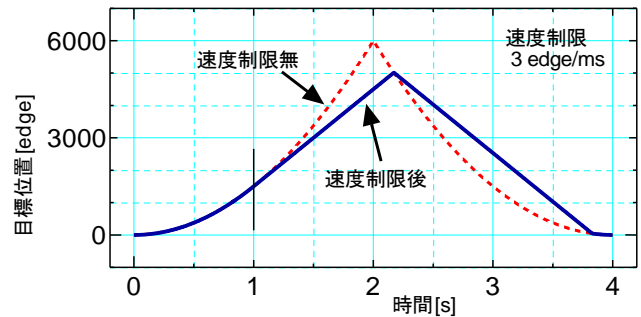


図 7 速度制限の例

Figure 7 A sample of speed limitation

5. モーションベースの制御

5.1 カヌー・スラローム競技の映像とデータの収集

開発に際し、東京都カヌー協会理事長の藤野 強氏 (元日
 本代表選手) の協力で、2020 年東京五輪で活躍が期待され
 る、若手日本代表選手のカヌー・スラローム競技の映像と加
 速度データを取得させていただいた (図 8)。



図 8 カヌー・スラローム競技の 360 度映像と動きのデータ
 を収集

Figure 8 360 degree video capturing and motion data acquisition
 in canoe slalom play

5.2 シンクロアスリートの主観的評価

シンクロアスリートを公式競技コースの一つである多摩川御嶽溪谷にある青梅市カヌー協会の施設に持ち込み、同溪谷をホームコースとしている同協会所属の方々を中心に27名の方に試乗していただいた(図9)。アンケート結果を表5に示す。

カヌー経験の有無にかかわらず全員に、「カヌー・スラローム競技の臨場感やリアル感を感じるか」について訊いたところ、100%の人がカヌーの経験の有無にかかわらず、「とても感じた」・「感じた」と答えた。

カヌー経験者に対する質問で、「実際の動きや映像が再現できているか」については、92%の方から「よく再現できている」・「だいたい再現できている」との高い評価が得られた反面、「実際の動きと比較して違和感を感じるか」という質問に対しては、62%の人が違和感を感じたことが判明した。自由記述で違和感の内容について書いてもらったところ、「目線が低い」という意見が多く、「目線が前にある」という意見もあった。これらは全天球カメラを取り付ける位置が、選手の位置より前方で頭より低いことに起因していると考えられる(図8)。

その他、92%のカヌー経験者が、未経験者に対してカヌーの魅力が伝わると感じ、さらに86%の方が、トップ選手の競技がシンクロアスリートで体験できれば練習に役立つと答えている。自由記述欄では、国際大会でのコースの攻略を検討し、イメージトレーニングを行えるよう、海外コースを体験できるようにしてほしいとの要望が多く寄せられた。

5.3 シンクロアスリートの客観的評価

人は目からの情報に惑わされやすく、カヌーに同乗しているかのような、迫力あるVR映像に圧倒され「よく再現できている」と評価している可能性を捨てきれない。そこでモーションベースの実際の動きについて、客観的評価を行った。

モーションベースのエンドプレート上に、スマートフォンを固定し、リプレイモードで再生しシンクロアスリートの動きを測定する。その結果と、カヌーにスマートフォンを取り付けて測定した時のカヌーの動きについて比較を行った。

x軸を中心とした前後の回転(ピッチ)の比較を図10に、z軸を中心とした左右の回転(ロール)の比較を図11に示す。ピッチとロールそれぞれ、カヌーの激しい動きに対して、図7で示した速度制限が全体的にかかりながら、可動範囲(表2)内で動作していることがわかる。なお、スタートした直後、シンクロアスリートの動きが1sほど角度がゼロのままとなっている。これは乗り降りのしやすさを考慮して、椅子が可動範囲の中心より下にある状態からスタ

ートさせているためである。スタートしてから可動範囲の中心付近に到達するまで、位置フィードバックが強く働く



図9 シンクロアスリートの試乗

Figure 9 Demonstration experiment of Synchro-athlete

表5 主観的評価結果

Table 5 Results of subjective evaluation

年齢構成(全員)	10歳未満	10-29歳	30-49歳	50歳以上	
	0%	44%	11%	44%	
カヌー経験(全員)	経験なし	1年以内	5年以内	10年以内	それ以上
	7%	4%	11%	22%	52%
カヌー競技の臨場感やリアル感を感じるか(全員)	とても感じた	感じた	どちらとも言えない	感じなかった	全く感じなかった
	44%	56%	0%	0%	0%
実際の動きや映像の再現性(経験者)	よく再現できている	だいたい再現できている	どちらとも言えない	あまり再現できていない	再現できていない
	42%	50%	8%	0%	0%
実際の動きと比較して違和感を感じるか(経験者)	強く感じた	少し感じた	あまり感じなかった	ほとんど感じなかった	
	4%	58%	38%	0%	
未経験者にカヌーの魅力が伝わると感じるか(経験者)	とても感じる	感じる	どちらとも言えない	感じない	全く感じない
	38%	54%	8%	0%	0%
トップ選手の競技体験は練習に役立つと感じるか(経験者)	とても感じる	感じる	どちらとも言えない	感じない	全く感じない
	41%	45%	9%	5%	0%

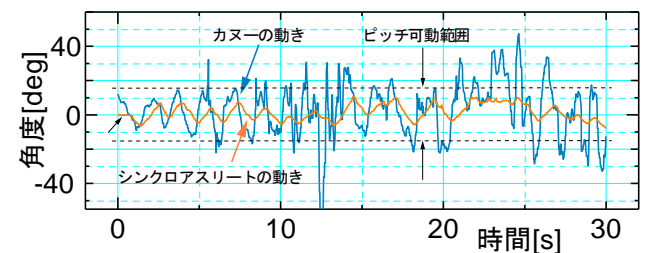


図10 カヌーとシンクロアスリートの動きの比較(ピッチ)

Fig.10 Comparison between motions of canoe and Synchro-athlete (Pitch)

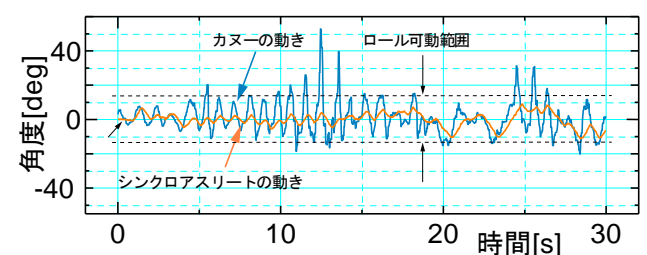


図11 カヌーとシンクロアスリートの動きの比較(ロール)

Fig.11 Comparison between motions of canoe and
 Synchro-athlete (Roll)

ため、椅子は傾かずに上昇する。

さらに y 軸と平行に上下する動きについては、ボード線図を作成した。入力として最大両振幅 10mm の単一周波数の正弦波及びランダムノイズでモーションベースを駆動し、ロータリーエンコーダから得られた位置を出力として作成したボード線図を図 12 に示す。ランダムノイズでの測定では、100Hz サンプリングで 4096 ポイントのデータをハニングウィンドウ処理後、クロススペクトル法で伝達関数を計算し 20 回の平均を行った。ゲイン-6dB でみた場合、2.2Hz 程度まで追従している。

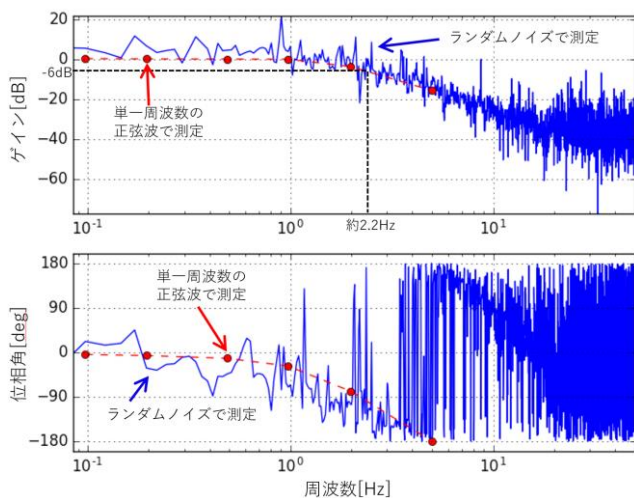


図 12 モーションベース周波数特性

Fig.12 Frequency characteristic of the motion base

6. まとめ

3 自由度モーションベースと VR ゴーグルを用いて、自分が選手として競技に参加しているかのような臨場感あふれる「映像・音声・動き」を提供し、リアルタイム観戦も可能なスポーツ観戦システム「シンクロアスリート」の開発を行った。モーションテーブルのピッチ・ロール運動と上下運動により、選手が感じる動き、あるいは選手が操作するカヌーなどの乗り物の動きを体験することができる。搭乗者の安全のため、速度制限を設け、シンクロアスリートが過激な動きをしないような工夫も行った。

実際のカヌー・スラローム競技に応用したところ、試乗した方々から、実際の動きや映像の再現性が高いとの主観的評価を頂いた。また客観的評価では、意図したとおりにカヌーの動きを再現できていることが確認できた。

2020 年東京オリンピックでカヌー・スラローム競技が開催される江戸川から、広報と区民の理解を深めるために、江戸川区民まつり、葛西まつり、江戸川区産業ときめきフェア等への展示・運用の依頼があり、協力を行っている。

多数の区民の皆様楽しんでいただいている他、フィードバックも集めており、改良に役立てたい。

また、東京オリンピックに向けて、江戸川区の紹介で、区内の企業と実用化の話が進んでいる。今後、改良を進めると共に、技術移転によりオリンピックまでに商品化を目指していく。

謝辞 本研究開発にご協力いただいた、江戸川区産業振興課・スポーツ振興課の皆様、東京都カヌー協会の関係者の皆様に深く感謝する。

参考文献

- [1] CJ 4DPLEX 社:
<https://www.cj4dx.com/>, (参照 2018-05-09).
- [2] MediaMothion 社:
<http://www.mediamotion.com/>, (参照 2018-05-09).
- [3] UNITED CINEMAS 4DX:
<http://www.unitedcinemas.jp/4dx/>, (参照 2018-05-09).
- [4] TOHO CINEMAS MX4D:
<https://www.tohotheater.jp/service/mx4d/>, (参照 2018-05-09).
- [5] D.Stewart: A Platform with Six Degrees of Freedom, Vol.180, No.15, pp.371-386, 1965.
- [6] Ka C. Cheok, James L. Overholt, Ronald R. Beck: Exact methods for determining the kinematics of a stewart platform using additional displacement sensors, Journal of Field Robotics, Vol.10, No.5, pp.689-707, 1993.
- [7] (株)コスメイト: 6 軸モーションスペース,
http://www.cosmate.co.jp/products/mc_products/mc_products.html, (参照 2018-05-09).
- [8] 妹尾武治: 効率的なベクション駆動に関する知見と脳イメージング研究から得られたベクションの知見の VR コンテンツへの活用可能性, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.14, No.4, pp.481-190, 2009.
- [9] 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, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.16, No.2, pp.283-292, 2011.
- [10] 浜口雅史, 谷口隆雄: 3 自由度パラレルリンク型アクティブ吸振器付き搬送台車による水平化制御 (搬送台の鉛直方向変位を零とする水平化制御), 日本機械学会論文集, Vol.79, No.798, pp.102-112, 2013.2.