

推薦コンシューマ・デバイス論文

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,a)} 山下 晃弘^{1,b)} 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

受付日 2019年2月28日, 採録日 2019年7月11日

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。本報告では、3自由度モーションベースの制御方法とカヌースラローム競技への応用および評価について述べる。

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

KATSUSHI MATSUBAYASHI^{1,a)} AKIHIRO YAMASHITA^{1,b)} TOSHIKI TOMIHARA² YUNOSUKE SATO³
KAZUNORI TAKISHIMA¹ AKIRA HOMMA⁴ SENRI YOSHIKAWA²

Received: February 28, 2019, Accepted: July 11, 2019

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, the application to canoe slalom and the evaluation 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。映像ととも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ほか、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ものではない。

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・

¹ 東京工業高等専門学校
National Institute of Technology, Tokyo College, Hachioji,
Tokyo 193-0997, Japan

² 筑波大学
University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8550, Japan

³ 豊橋技術科学大学
Toyohashi University of Technology, Toyohashi, Aichi 441-
8580, Japan

⁴ 東京農工大学
Tokyo University of Agriculture and Technology, Koganei,
Tokyo 184-8588, Japan

a) matsu@tokyo-ct.ac.jp

b) yamashita@tokyo-ct.ac.jp

本論文の内容は2018年5月のコンシューマ・デバイス&システム研究発表会にて報告され、同研究会主査により情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス&システムへの掲載が推薦された論文である。

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等装置が大がかりで、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ともに競技に参加しているかのような臨場感あふれる「選手目線での映像・選手が聞く音声・選手の動き」(以下、「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ほか、今まさに競技している選手の「映像・音声・動き」をライブ配信・再生するリアルタイムモードも実装している。

本システムは一般的な 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等から、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効果 [8] により、擬似的に感じさせることができるため [9]、小型軽量を優先してあえて 3 自由度で開発を行った。

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、選手がつね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、1 つはあらかじめ「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 1 つは今まさに競技している選手の「映像・音声・動き」を時間差ほぼなし(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(ライブ配信)での提供である。

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	リアル タイム モード 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)	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)
	○	○	ヘッドマウントVRケース	
	○	○	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

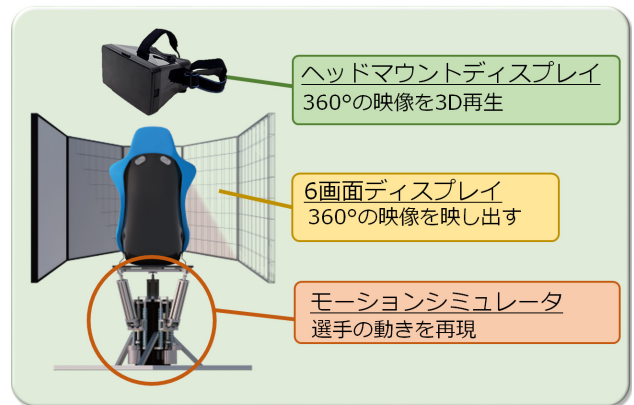


図 1 観戦者側システム構成

Fig. 1 Configuration of the system for spectators.

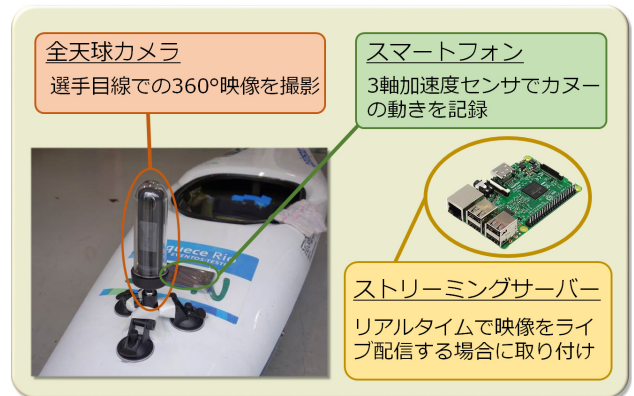


図 2 選手側システム構成

Fig. 2 Configuration of the system for players.

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、構造および各部の名称を図 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。

2018年になって、3自由度のモーションベースを使ったドライブシミュレータが発表された [10]。しかし目的がシンクロアスリートとは異なることから、CGと人工的に設定した動きのデータを用いている。また、シンクロアスリートの小型・軽量化に貢献している、体重をキャンセルする機構（特許出願済み）を備えていない。そのためか、強力なモータを使用しており消費電力は、シンクロアスリートの約2.5倍の2kWとなっているほか、重量も2倍以上となっている。最大ストローク（ヒープ）もシンクロアスリートの60%ほどである。

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 36V350W DC ブラシモータ
積載重量	搭乗者・付属品を含めて 100kg
外形寸法	(横, 縦, 高) ≒ (920mm, 1,100mm, 650mm)
重量	約 40kg
最大ストローク	100mm
最大傾斜角	ピッチ角 $\theta \approx 16.4 \text{ deg}$, ロール角 $\psi \approx 13.5 \text{ deg}$

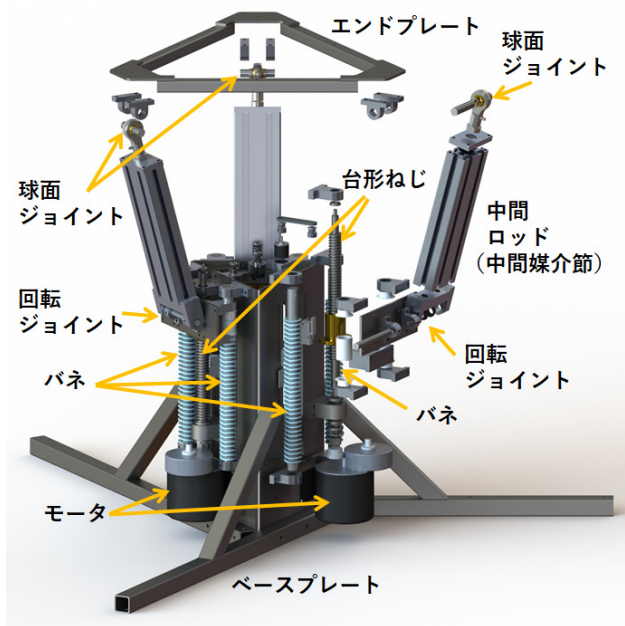


図 3 モーションベースの構造

Fig. 3 Structure of the motion base.

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量

モーションベースのリンク構造を図 3 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および姿勢から、リニアアクチュエータの変位 u_i を逆運動学で求める [11]。

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、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、式 (3) は、

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

となる。式 (5) 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、

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

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 ($i = 1, 2, 3$)

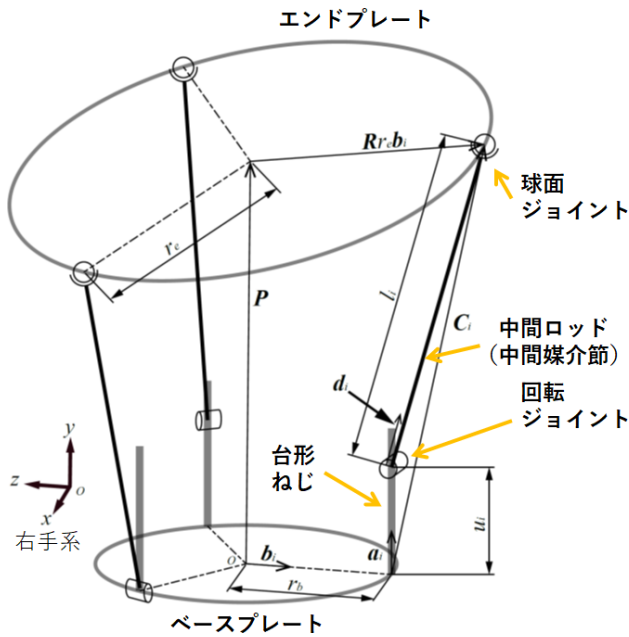


図 4 モーションベースのリンク構造

Fig. 4 Linkage mechanism of the motion base.

となり、変形すると次式を得る。

$$u_i^2 - 2C_i^T \cdot a_i \cdot u_i + C_i^T \cdot C_i - l_i^2 = 0 \quad (7)$$

2次方程式の解の公式より、 u_i は、

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

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、式 (8) の符号はマイナス側をとる。よって、

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

本研究で開発したモーションベースでは、 θ , ψ およ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、

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

となり、リニアアクチュエータは、 120° ごとに配置しているので、 b_i は、次式となる。

$$\begin{cases} b_1 = [0, 0, -1]^T \\ b_2 = [-\frac{\sqrt{3}}{2}, 0, \frac{1}{2}]^T \\ b_3 = [\frac{\sqrt{3}}{2}, 0, \frac{1}{2}]^T \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 a_i は i によらず、すべて同じであり、

$$a_1 = [0, 1, 0]^T \quad (12)$$

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

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

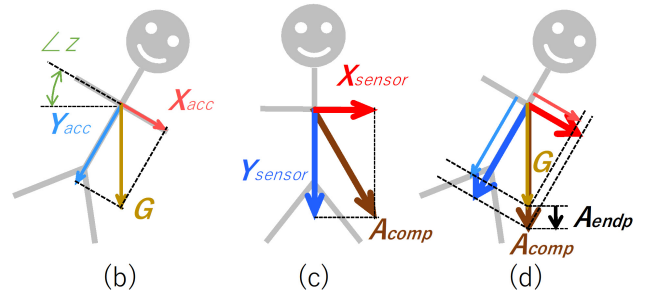
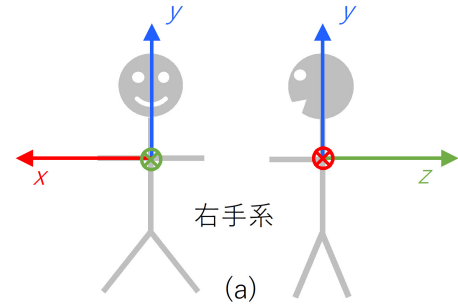


図 5 モーションベースの制御

Fig. 5 Control of the motion base.

す。各寸法は、表 3 の最大ストロークが 100 mm 以上であること、120 kg の耐荷重を満足すること、および椅子の座面が搭乗者が踏み台や介助者を利用することなく、1 人で容易に乗り降りできる高さであること等を考慮し決定した。

4.2 カヌーの動きの再現

本システムでは、カヌーの実際の動きをスマートフォンで測定し、モーションベースのエンドプレートに取り付けられた椅子の動きで再現することで、シンクロアスリート搭乗者はカヌーの動きを体験する。そのためスマートフォンは選手でなくカヌーに取り付けている (図 2)。

カヌーや搭乗者の座標系を図 5 (a) に示す。座標軸はカヌーおよび搭乗者の右手方向を x 軸、上方向を y 軸、前方向を $-z$ 方向としている。

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、次のようになる。

$$\angle z = \tan^{-1} \frac{Y_{acc}}{X_{acc}} \quad (13)$$

$$\angle x = \tan^{-1} \frac{Y_{acc}}{Z_{acc}} \quad (14)$$

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))．このときの, A_{endp} の大きさ, $|A_{endp}|$ は, 次式となる．

$$|A_{endp}| = \sqrt{|X_{sensor}|^2 + |Y_{sensor}|^2 + |Z_{sensor}|^2} - |G| \quad (15)$$

なお, カヌー上でスマートフォンに測定される加速度を搭乗者は体感することになるが, 頭と背中を椅子にしっかり固定している場合, VR ゴーグルを用いて見る映像は, カヌーそのものが動くことによる映像の動きに加え, 椅子が動くことによる映像の動きも加えられてしまうことに注意が必要である．

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, つね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．可動範囲のどの位置で動作しているかを計測するため, 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 (カットオフ周波数約 6.5 Hz) で高周波成分をカットする．
 - (2) 式 (15) 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 秒ごとの目標位置を線形補間により計算し, コントローラに送信する．
- (2) の 2 回積分は, 次式で計算する．

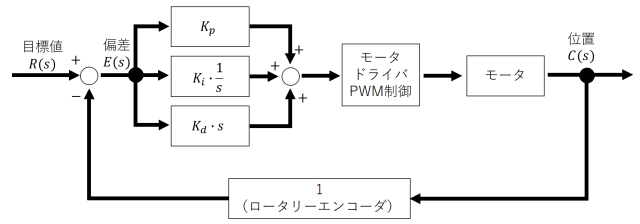


図 6 PID によるモータ制御
Fig. 6 Motor control using PID.

$$\begin{cases} v = \int (|A_{endp}| - K \cdot p - A \cdot v) dt \\ p = \int v dt \end{cases} \quad (16)$$

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) である． 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 の値はともに 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製作し, 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, 速度制限を行ったうえで, 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 1 kHz 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り, ロータリーエンコーダの分解能は 400 edge/r となる．台形ねじのピッチは 5 mm であることから, 次のように単位 edge を定義する．

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

速度制限後の目標値 y_n [edge] は, ある時刻 n [ms] のときの目標値を x_n [edge], 最大速度を v [edge/ms] とすると, 次の式で表される．

$$y_n = \begin{cases} y_{n-1} + v & (x_n - y_{n-1} > v) \\ x_n & (|x_n - y_{n-1}| \leq v) \\ y_{n-1} - v & (x_n - y_{n-1} < -v) \end{cases} \quad (17)$$

速度制限は 1 edge/ms (12.5 mm/s) の整数倍で設定でき, 現在 3 または 4 edge/ms を標準設定として運用している．3 edge/ms の速度制限で 1 s 後に速度制限に到達し, 2 s 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．

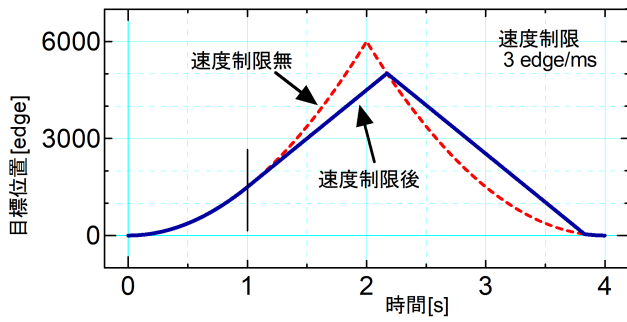


図 7 速度制限の例

Fig. 7 A sample of speed limitation.

5. データ収集とシンクロアスリートの評価

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）。

5.2 カヌー経験者の主観的評価

シンクロアスリートを公式競技コースの1つである多摩川御嶽渓谷にある青梅市カヌー協会の施設に持ち込み、同渓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。



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
Fig. 8 360 degree video capturing and motion data acquisition in canoe slalom practice.



図 9 シンクロアスリートの試乗

Fig. 9 Experience 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%

5.3 一般の方の主観的評価

一般の方による評価も得るため、イベントに招待される等して出展した際に、試乗者にアンケートを行った。イベ

表 6 イベントと有効回答数

Table 6 Events and the number of valid responses.

日付 (2018 年)	展示会名称	有効回答数
5 月 25 日	2018 健康フェスタ・食育フェスタ	138 人
8 月 7 日	文部科学省情報ひろば	53 人
10 月 10~12 日	国際福祉機器展	499 人
11 月 15~16 日	江戸川区産業とさめきフェア	138 人
12 月 24 日	チャレスポ! TOKYO	373 人
	計	1,221 人

ントの一覧を表 6 に示す。アンケートの有効回答が得られた人数の合計は、1,221 人（うち、男性 602 人、女性 619 人）である。コンテンツは、カヌーのほか、各競技団体等からの要望を受け、スピードスケート、パラ陸上等を追加している。最も搭乗者が多い競技はカヌーであり、全体の約 40%の方が体験した。体験した競技の経験は、83~96%の方が「経験なし」と回答している。

「体験した競技が楽しかったかどうか」では、91~98%の方が、「楽しかった」と解答し、「どちらでもない」・「楽しくなかった」と答えた方はほとんどいなかった。「体験の前後で実際に競技をしてみたいという気持ちが増えたか」では、75~83%の方が「増えた」または「少し増えた」と答えている。これらの結果から、特に普段体験することが難しいスポーツに対して、シンクロアスリートは競技の理解や普及等の振興に寄与できると考えられる。

なお、これまで約 2,000 名の方に試乗していただいたが、強い酔いを感じ、最後までコンテンツを体験することができなかった方は 1 名であった。

5.4 シンクロアスリートの客観的評価

主観的評価では高い評価が得られたが、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。

人が搭乗した状態を再現するため、モーションベースのエンドプレート上に 60 kg 分のバーベルの錘を固定した。さらにその上にスマートフォンを貼り付け、リプレイモードで再生することで、シンクロアスリートの動きの測定を行った。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ときのカヌーの動きについて比較する。

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分かる。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

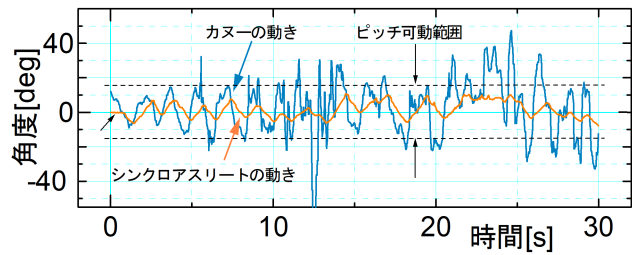


図 10 カヌーとシンクロアスリートの動きの比較（ピッチ）
Fig. 10 Comparison between motions of canoe and Synchro-athlete (Pitch).

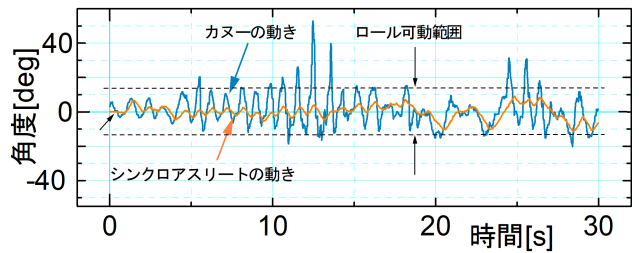


図 11 カヌーとシンクロアスリートの動きの比較（ロール）
Fig. 11 Comparison between motions of canoe and Synchro-athlete (Roll).

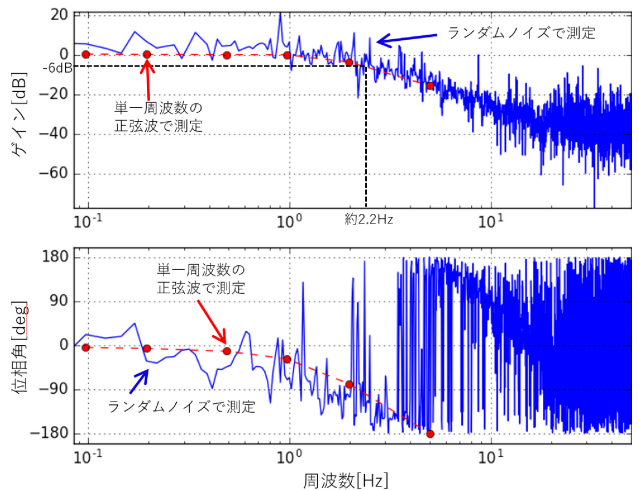


図 12 モーションベース周波数特性
Fig. 12 Frequency characteristic of the motion base.

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 10 mm の単一周波数の正弦波およ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、100 Hz サンプリングで 4,096 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 -6 dB でみた場合、2.2 Hz 程度まで追従している。

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等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、試乗したカヌー関係者の方々から、実際の動きや映像の再現性が高いとの主観的評価をいただいた。一般の方からは、ほとんどの方が競技を楽しむことができ、実際に体験してみたいとのアンケート結果が得られ、特に普段体験することが難しい競技について、振興に大きく役立つことが期待できる。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区を始めとして、東京都内の自治体が主催する様々なスポーツイベントや展示会から出展依頼を受け、これまでに2,000名以上の方々も搭乗し、普段経験が難しいスポーツをシンクロアスリートで体験してもらっている。装置の改良やコンテンツの充実につながるフィードバックも集めており、VRゴーグルで見る映像の動きについてもより自然になるよう改良を進め、技術移転により2020東京オリンピックまでに商品化を目指す。

参考文献

- [1] CJ 4DPLEX 社, 入手先 (<https://www.cj4dx.com/>) (参照 2018-05-09).
- [2] MediaMothion 社, 入手先 (<http://www.mediamotion.com/>) (参照 2018-05-09).
- [3] UNITED CINEMAS 4DX, available from (<http://www.unitedcinemas.jp/4dx/>) (accessed 2018-05-09).
- [4] TOHO CINEMAS MX4D, available from (<https://www.tohotheater.jp/service/mx4d/>) (accessed 2018-05-09).
- [5] Stewart, D.: A Platform with Six Degrees of Freedom, *Proc. Institute of Mechanical Engineering*, Vol.180, No.15, pp.371-386 (1965).
- [6] Cheok, K.C., Overholt, J.L. and Beck, R.R.: 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軸モーションベース, 入手先 (<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] VR モーションシート, 入手先 (<http://www.forum8.co.jp/product/ucwin/road/vrseat.htm>) (参照 2018-05-09).
- [11] 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).

推薦文

本論文は、自由度モーションベースとVRゴーグルを用いて、360°映像、音声、動きによる臨場感溢れる体験ができる、スポーツ観戦システム「シンクロアスリート」を提案しています。カヌー・スラローム競技への応用について、システム構成、制御方法、評価方法と結論が論理的、かつ緻密に説明されており、コンシューマ・デバイス論文として重要な情報提供であると思います。

(コンシューマ・デバイス&システム研究会前主査
寺島 美昭)



松林 勝志 (正会員)

1965年生。1989年山梨大学大学院修士課程修了。2005年同博士課程修了。博士(工学)。1991年東京高専助手。1999年Scotland Dundee University 在外研究員。2007年東京工業高等専門学校情報工学科教授。組み込みシステムに関する研究に従事。2013年関東工学教育協会業績賞。2013年日本工学協会工学教育賞・文部科学大臣賞。2018年情報処理学会・CDS研究会優秀発表賞。日本バーチャルリアリティ学会、日本工学教育協会各会員。



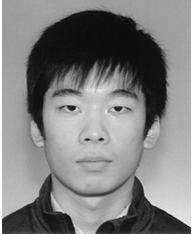
山下 晃弘 (正会員)

1983年生。2008年北海道大学大学院情報科学研究科修士課程修了。2010年同博士課程修了。博士(情報科学)。2011年株式会社調和技研代表取締役。2013年東京工業高等専門学校情報工学科助教。2017年同准教授。機械学習、組み込みシステム、ウェブマイニングに関する研究に従事。2018年情報処理学会・CDS研究会論文賞。人工知能学会、日本工学教育協会各会員。



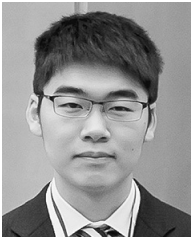
富平 準喜 (学生会員)

1997年生。2018年国立東京工業高等専門学校情報工学科卒業。同年筑波大学情報学群知識情報図書館学類編入学。現在在学中。シンクロアスリートのソフトウェアの開発に取り組む。



佐藤 悠之輔

1998年生。2018年東京工業高等専門学校機械工学科卒業。同年豊橋技術科学大学工学部機械工学課程編入学。現在在学中。シンクロアスリートの機構の設計・開発に取り組む。



瀧島 和則

1997年生。2018年国立東京工業高等専門学校情報工学科卒業。同年東京工業高等専門学校専攻科機械情報システム工学専攻入学。現在在学中。シンクロアスリートを使用した重機の遠隔操縦に関する研究に取り組む。



本間 朗

1997年生。2018年国立東京工業高等専門学校情報工学科卒業。同年東京農工大学工学部情報工学科編入学。現在在学中。シンクロアスリートのハードウェア・ファームウェアの開発に取り組む。



吉川 千里

1997年生。2018年国立東京工業高等専門学校情報工学科卒業。同年筑波大学情報学群情報科学類編入学。現在在学中。シンクロアスリートのソフトウェアの開発に取り組む。