

# [研究論文] バーチャルリアリティゲーム用途を想定し、操作物形状に最適化できる形状自由度特性を有したマーカ技術の有効性検討

宇佐美真<sup>1</sup>・杉村博<sup>2</sup>・三浦喬平<sup>1</sup>・一色正男<sup>1,2</sup>

1 工学部 電気電子工学専攻

2 創造工学部 ホームエレクトロニクス開発学科

Effectiveness Study of a fiducial marker technology with deformable characteristic to optimize the marker shapes which are attached to hand-held devices for use in virtual reality games.

Makoto USAMI<sup>1</sup>, Hiroshi SUGIMURA<sup>2</sup>, Kyohei MIURA<sup>1</sup>, Masao ISSHIKI<sup>1,2</sup>

## Abstract

VR (バーチャルリアリティ) を用いたアクションゲームでは手など人の動作をシステムにフィードバックすることが必要となる。そこで、没入型 HMD (ヘッドマウントディスプレイ) を装着した状態で、手軽にコンシューマグレードのデバイスのみでヒューマンインタラクティブな VR ゲームを実現するための、マーカ視覚認識による手法について検討した。従来のマーカ方式および自動認識コードでは形状自由度が低く操作物に最適なマーカ形状を実現することが難しい。そこで本稿では、カラービットと呼ばれる 1 次元カラーコードを 2 次元化して 3 次元姿勢推定を行うための、形状自由度を持った VR マーカを開発した。操作物に装着された VR マーカを視覚認識し、トラッキングしながらアクションゲームシーンへ手の動きをフィードバックする VR ゲームシステムを想定し、開発した VR マーカの有効性について検証する。

Keywords: VR, HMD, カラービット, VR マーカ

## 1. はじめに

VR はゲーム業界において極めて有望であり、これまでさまざまな研究と開発がなされてきた。昨今では、Oculus Rift<sup>1)</sup>の登場があり、Sony Morpheus プロジェクト<sup>2)</sup>が発表され、急速に VR ゲームに対するユーザの期待が高まってきている。一方、Oculus Rift は高性能であるが、ハイパフォーマンス PC を接続して使う必要があるためシステムが高価であり、未だ手軽に楽しめる域には達していない。さらに、VR 普及への課題としてあげられるのが、実体験を伴わずに楽しさを伝えるのが困難である点であろう。TV コマーシャルやウェブサイトなどのメディアで、没入型 VR の面白さはユーザに伝えきれないと考えられる。そこで、性能や機能は専用機である Oculus Rift などに及ばなくとも、手軽に VR 体験できるアクションゲームに反映できる VR ゲームシステムを

システムを提案することが VR ゲーム普及を加速する上で極めて重要な課題であると考えた。

人間のアクションをとまなう VR ゲームでは、没入型ヘッドマウントディスプレイ装置 (VR ゴーグル)、PC および、手の動作をフィードバックするためのゲームコントローラなど電子制御をとまなう装置で構成されるシステムが一般的であり、このようなシステムの場合、手軽に持ち運んで VR アクションゲームを楽しむのは容易ではない。そこで可搬性を有し、低コストで手軽に楽しめるシステムが VR ゲーム業界に必要であると考えた。本稿では、Fig. 1 に示すように、スマートフォン、Google Cardboard<sup>3)</sup>と呼ばれる簡易 VR ゴーグルおよび電子制御不要のハンドルに装着された 2 次元カラーコードマーカといったコンシューマグレード (汎用) デバイスのみを用いて可搬性と低コスト性を備えながら人の手の動きを想定した、マーカ認識で人の動作を捉える従来方式とし

て ARToolKit<sup>3)</sup> または、その改良された仕組みが幅広く使用されているが、ハンドルなど操作物の形状に合わせてマーカ形状を自由に変形させることは困難である。本稿では、3次元空間における手の動きをハンドルに装着されたカラーコード式マーカをカメラで視覚認識およびトラッキングし、ゲームシーンへフィードバックする方式に有効とみられる形状自由度をもった2次元マーカを開発し、ゲームに必要な姿勢推定精度を確認した。2章では、関連する従来技術について、3章では提案手法に関して、4章では実験と結果について、5章で考察と将来に向けての方向性を述べる。

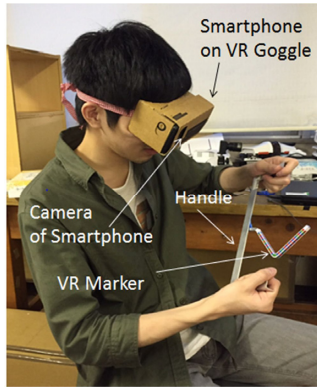


Fig. 1 VR ゲームシステム

## 2. 関連技術と方式

現在、VR ゲーム用ヘッドマウントディスプレイシステムとして先行している例として Oculus Rift タイプが挙げられる。Oculus Rift では、高性能を実現するため高価格なハイパフォーマンス PC をケーブルにて接続する必要がある。さらに電子制御されたゲームコントローラを接続し手の動きをゲームに反映することが一般的な使用例である。持ち運んで手軽に没入型 VR ゲームを楽しむことは困難である。

また、手のジェスチャーなどを光学式センシング技術で認識するデバイス Leap Motion<sup>4)</sup> は、Oculus Rift に接続して使用可能で、前面に装着することでユーザインターフェースとして使用することが可能である。しかし、物理的な操作物が存在しないため、人が何かを操作しているというリアルな触覚的実感が乏しく、ヒューマンインタラクション性の観点で課題があると考えられる。

一般家庭に広く普及しているコンソール型ゲーム専用機としては PlayStation<sup>5)</sup>、Nintendo Wii<sup>6)</sup> が存在する。これらは VR ゲームを処理するに十分な計算能力を有するが、人の動きをトラッキングするには専用の電子制御されたゲームコントローラやセンサを必要とする点で、手軽な可搬性を考慮したシステムではなく据え置き用である。

AR 用途では 2 次元マーカ方式として ARToolKit が物体の姿勢推定に幅広く応用されており ARToolKit のマーカは正方形で作成される。たとえば、操作物が車のハン

ドルのような円形であった場合でも、正方形のマーカを使う必要がある。操作物は VR ゲームシーンごとに操作し易いような形状であることが望ましい。操作物に装着する視覚認識用マーカが、操作物の形状に対して装着しやすく最適化する方法を検討した。そこで操作物の形状に適合させる形状自由度を持ったマーカ方式が有効であるのではないかと考えた。

## 3. 提案手法

本章では、VR アクションゲームにおいて、人の動作をトラッキングするために有効と考えられる形状自由度特性を有した 2 次元マーカの開発と仕組みについて提案し、マーカを活用してコンシューマグレードの汎用デバイスのみを用いて手軽に VR アクションゲームシステムを構成する手法について論述する。カラービット (CB)<sup>7,8)</sup> と呼ばれる形状自由度特性を有する 1 次元カラーコード 2 次元化し 2 次元 VR マーカ (VR マーカ) を考案し開発した。VR マーカを活用することにより、ゲームシーンで人の動きを VR ゲームシステムにフィードバックする。

### 3.1 形状自由度特性を有する 1 次元カラーコード

Fig. 2 は、赤、緑、青色、それぞれのピクセルの集合 (セル) を連結した図形であり、セルの形状には特別な意味を持たないものとする。このとき、左端の赤セルの隣に青セルがあったとき、つまり、セル色が赤から青に遷移した状態を“1”と定義する。同様に左端から 2 番目の青セルから 3 番目の緑セルへ遷移した状態を“1”と定義する。3 番目の緑セルから 4 番目の青セルへ遷移した状態を“0”と定義する要領で、Fig. 3 のような 6 通りの遷移法則が定義できる。CB をカメラ画像からコードとして切り出すとき、先頭セルと後端セルを区別する必要があるゆえ、先頭セルは赤、後端セルは、緑または青で終了することにする。後端セルは赤で終わらないために設けるダミービットとする。総セル数  $N$  に対して、 $2^{(N-2)}$  のコード値の表現が可能となる 1 次元コードである。

Fig. 3 の法則に従い 1 次元バイナリーコードの形成 (Fig. 4) が可能であり、本稿で使用した 1 次元カラーコード方式はセルの大きさ、形状に依存せず、赤、緑、青の色遷移状態を読み取ることでコードとして認識される。そこで、マーカの形状を VR システムで使われる操作物の形状を最適化するために、CB を 2 次元化したマーカを開発した。マーカが傾いてカメラで認識されたとき 3 次元空間において回転、並進したと判断する方式を考えた。この場合カメラの 2 次元イメージセンサ上に展開されるマーカの回転、並進量を計算することで、容易に 3 次元空間でマーカの姿勢が推定できると考えた。



Fig. 2 形状自由度特性を有する 1次元カラーコード (カラービット) (CB)

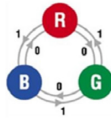


Fig. 3 色遷移とコーディング法則性



Fig. 4 1次元カラーコード(直線 CB)

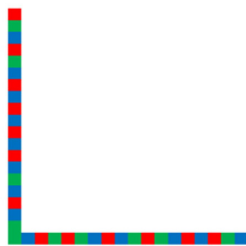


Fig. 5 L字型に変形 (2次元化)

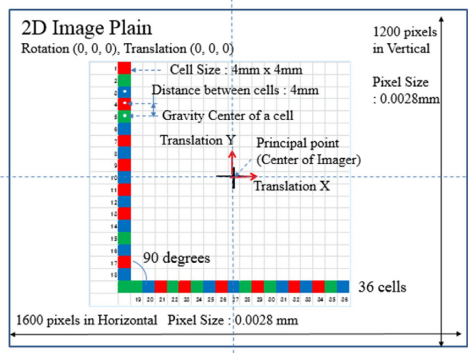


Fig. 6 VR マーカの設計

### 3.2 VR マーカの開発

Fig. 4 に示す CB は、1次元コードであるため、マーカとして 3次元姿勢推定に使用することはできない。しかし、Fig. 4 に示すように各セルのサイズを同じにして直線形状にしたとき、視覚認識されたセルの重心中心位置を基準とし、セル間距離を測定することで、CB をスケールとして使用可能である。つまり、セル間距離がイメージセンサの 2次元平面での変化量として視覚認識されるためである。そこで、形状自由度特性を活用して Fig. 5

のように L字型 (角度 90 度に変形) CB を 2次元に変形することにより、マーカの 3次元姿勢推定を可能とした。Fig. 6 は 36セルで構成される L字型 VR マーカの設計を示す。カメラのイメージセンサ表面と正対し、レンズの主点と VR マーカ中心位置座標が一致するときを、Fig. 7 に示す世界座標系にて回転軸 Rotation (0, 0, 0), 並進軸 Translation (0, 0, 0)と定義する。赤, 緑, 青それぞれのセルサイズは全て 4 x 4mm とする。

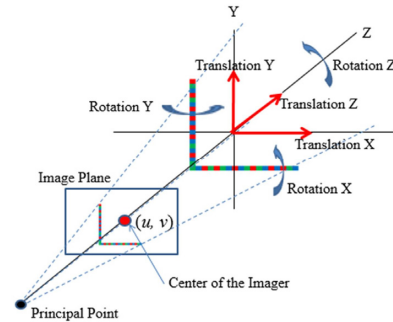


Fig. 7 世界座標系と VR マーカ

更に、CB の形状自由度特性を活かして、車のハンドルなどを想定した操作物の形状に VR マーカ形状を合わせた例を Fig. 8 に示す。この場合、操作物と VR マーカを一体化できる点で有利と考える。更に、操作物を柔らかい素材にしておいて、その変化量をゲームへ反映することもユニークなゲーム体験を拡張するのではないかと考えた。Fig. 8 の場合、ハンドル自体が変形しないと想定すると、Start Bit, Bit A 及び Bit B の 3セルの位置が視覚認識されることで姿勢推定は可能である。

本稿では、VR マーカの基本原理と精度特性を測定し優位性を見出すため、計算が容易な基本形状として L字型の VR マーカでの検討を行うものとする。

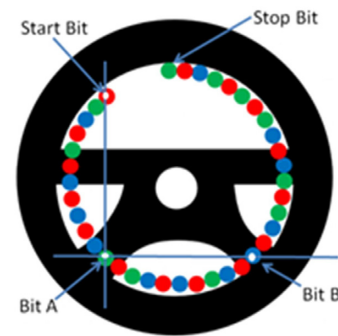


Fig. 8 操作物と VR マーカ

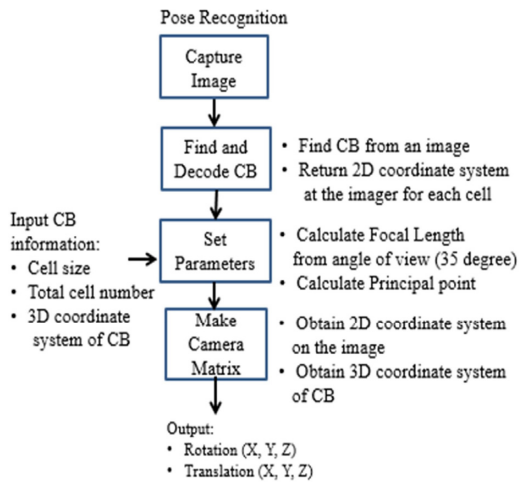


Fig. 9 認識フロー

### 3.3 VR マーカ姿勢推定のフロー

Fig. 9 に示す CB 認識フローにて, VR マーカの Rotation (X, Y, Z), Translation (X, Y, Z) を推定する. カメラが VR マーカを探して認識し, PC に内蔵されたデコードソフトウェア (ソフトウェア) にて VR マーカを切り出してデコードする. ソフトウェアは切り出したマーカより各セルの重心位置を求めことで, カメライメージセンサ上における 2 次元座標値を得る. ソフトウェアには, あらかじめ, セルサイズとセル数をインプットしておく.

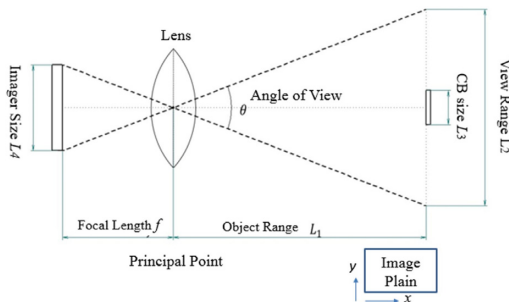


Fig. 10 ピンホールカメラモデル

ソフトウェアは, Fig. 10 に示すピンホールカメラモデル<sup>9)</sup>を使ってレンズ画角から焦点距離( $f_x, f_y$ )を求める. (単位ピクセル)

$$f_x = \frac{L_4 x}{2} \div \tan\left(\frac{\theta_x}{2}\right) \quad (1)$$

$$f_y = \frac{L_4 y}{2} \div \tan\left(\frac{\theta_y}{2}\right) \quad (2)$$

主点( $C_x, C_y$ )は, イメージセンサの中心として数式 3、4

として定義される. (単位ピクセル)

$$c_x = \frac{L_4 x}{2} \quad (3)$$

$$c_y = \frac{L_4 y}{2} \quad (4)$$

引き続き, ソフトウェアは VR マーカのセルサイズ, セル数を取得し, 数式 5 に示すカメラマトリクス(CM)を構成し, Rotation (X, Y, Z), Translation (X, Y, Z)を出力する.

$$CM = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

姿勢推定に際しては, OpenCV<sup>10)</sup>に用意されている関数 `cvFindExtrinsicCameraParams2` を使用してイメージセンサ上の 2 次元座標  $s(u, v)$  として, 数式 6 として表現される.

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

X, Y, Z は Fig. 7 の世界座標系における VR マーカの 3 次元座標である. 行列  $r_{11}$  から  $r_{33}$  は, 回転 (Rotation) 行列,  $t_1$  から  $t_3$  は並進 (Translation) ベクトルである. ここで, ロドリゲスの定理<sup>11)</sup>を使った, OpenCV の関数を用いて回転行列から回転ベクトルに変換する. 最終的に, Rotation (X, Y, Z) は単位ラジアンで, Translation (X, Y, Z) は, 単位 mm でイメージセンサの中心をからの変化量として求められる.

### 3.4 システムワークフロー

VR アクションゲームを想定したシステム (Fig. 1) は, 紙とプラスチックレンズで出来た簡易 VR ゴーグル, スマートフォン, VR マーカが装着された手持ち操作ハンドルのみで構成され, Fig. 11 の動作フローを提案する. 没入型 VR ゲームは人のアクションをとまうが, 通常, 安全性に配慮し椅子に座った状態での使用が推奨される. しかし没入状態では現実世界に存在する手持ち操作のハンドルを視認することができないため, 実際のゲームをスタートする前はスマートフォンのカメラを使ってビデオスルーモードにセットし, VR ゴーグル装着時に手元が見えるようにする. ハンドルを手にして VR マーカが認識された時点で没入ゲームモードに遷移する. マーカが認識されるためには, まず, マーカらしい被写体を検出しマーカを画像から切り出してデコードすることが必要である.

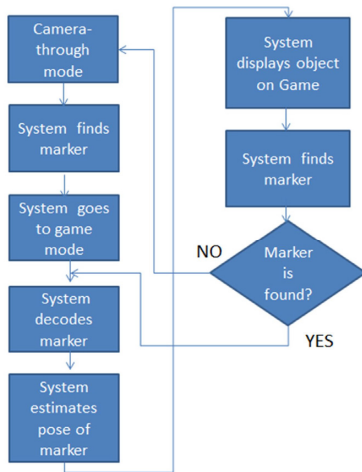


Fig. 11 システムワークフロー

デコードされた VR マーカの各 36 セルの中心座標値とイメージセンサの 2 次元平面に投影された 2 次元座標の関係性を元に、Fig. 7 に示した世界座標系において OpenCV を使って Rotation (X, Y, Z) と Translation (X, Y, Z) を計算し VR マーカの 3 次元姿勢推定を行う。Rotation (X, Y, Z), Translation (X, Y, Z) の計算値をゲームアプリケーションにリアルタイムでフィードバックすることで人が操作するハンドルの動きをスマートフォン上にディスプレイされる画像の動きとして反映させることを想定する。このルーチンがルーピングされて途切れなく VR マーカがトラッキングされることが重要である。

#### 4. 実験

本章では VR アクションゲーム実装を想定し、開発した形状自由度特性を有した VR マーカの有効性検証を行う。

##### 4.1 実験環境

Fig. 12 に示すように、カメラ、レンズ、スケール付きスライディングレールと VR マーカを回転させて物理角度が読み取れる実験環境を用意した。カメラレンズの画角は 35 度に設定、その時の焦点距離は 7.1mm である。カメラから VR マーカまでの距離はスライディングレール上のスケールで計測を可能とした。カメラは、Microvision 社の VC-4302 を使用し USB2.0 経由で PC に接続した。PC は、東芝ダイナブック、Intel Dual Core-i5 プロセッサ搭載版を使用した。Table. 1 に実験環境の性能、機能、設定仕様を示す。Fig. 13 は、PC 測定画面のスクリーンショットで、認識されたセルの重心に白色のドットをオーバーレイ表示した様子である。

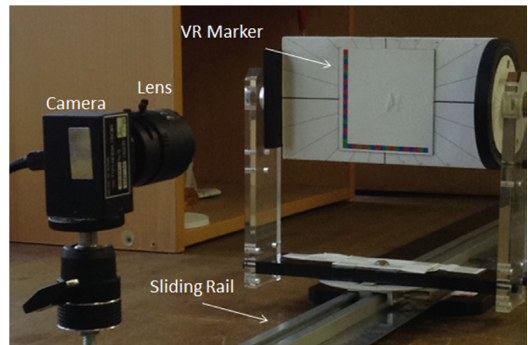


Fig. 12 実験環境



Fig. 13 測定画面のスクリーンショット

Table. 1 実験環境の仕様

アイテム	単位	スペックと設定	アイテム
カメラ	Pixel	1600 水平画素 1200 垂直画素	マイクロビジョン社 VC-4302
イメージャサイズ	mm	4.48H x 3.36V	
ピクセルサイズ	mm	0.0028 x 0.0028	
レンズと画角	度	35	Tamron MV12VM412
照明	Lux	500	白色 LED
照明色温度	K	5500	

##### 4.2 測定

本項では VR マーカを実験装置上で回転、並進させてスケールでの実測値とソフトウェアの出力値を比較することで誤差を検出する。

実験環境にて、回転精度について測定した誤差のデータを Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16 に示す。各測定は 100 回計測の平均値。実測に対して、システムのソフトウェアから出力された数値の誤差は、距離 700mm まで、Rotation X 及び Rotation Y が ±4 度以内、Rotation Z で ±3.5 度以

内であった。

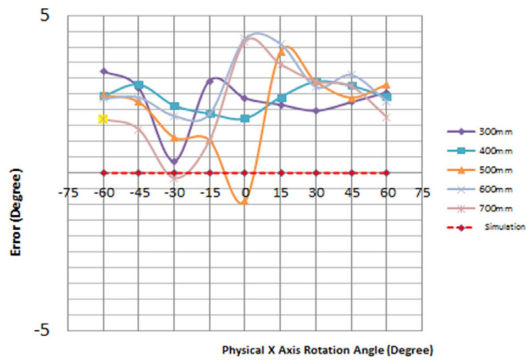


Fig. 14 Rotation X の誤差

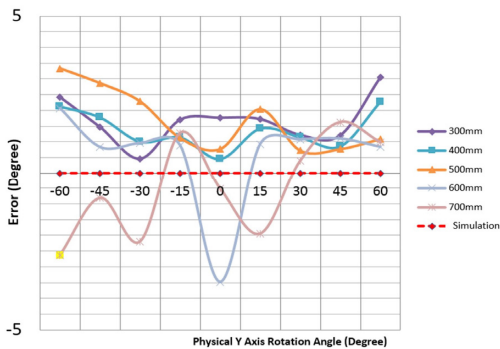


Fig. 15 Rotation Y の誤差

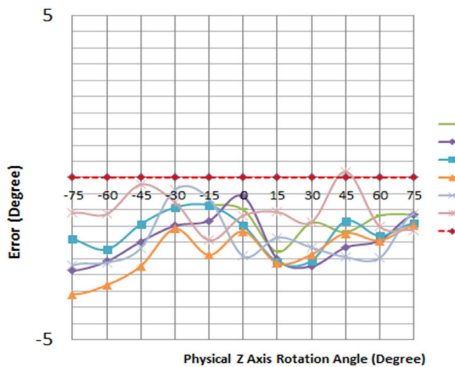


Fig. 16 Rotation Z の誤差

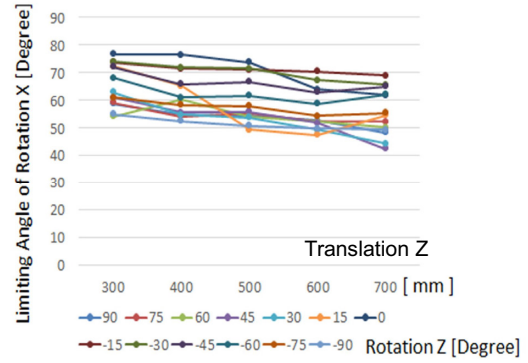


Fig. 17 Rotation Z と距離にもなる限界認識角度

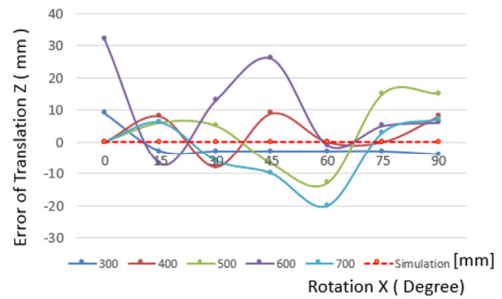


Fig. 18 Rotation X と Translation Z の誤差

Rotation X, Rotation Y ともに 0 度付近、つまりカメラのイメージセンサと VR マーカが正対するところで誤差が大きくなる傾向にあった。

カメラとマーカの距離 (Translation Z) を変化させながら VR マーカを回転させたときの認識限界となる角度を測定した。(Fig. 17) やや、距離が遠くなると限界角度が小さくなる傾向が見られたが、手の動きをカメラでとらえるマーカの位置として 300mm くらいが適当と想定すると、±54 度以上の傾き限界値が得られた。

Translation Z の測定結果を Fig. 18 に示す。5.3% 以内の誤差であった。

実験結果から、L 字型に変形させた VR マーカでの姿勢推定の観点において、手軽に VR アクションゲームを楽しむために有効なマーカトラッキング精度を有すると考える。

### 5. まとめと将来に向けて

本稿では、コンシューマグレードのデバイスのみで構成される VR アクションゲームを想定したシステム提案と、操作物の形状に合わせて変形可能な VR マーカの開発と有効性検証を行った。カラービットと呼ばれる 1 次元カラーコードの形状自由度特性を活かして、L 字型に変形させることで 2 次元 VR マーカを構成し 3 次元姿勢推定を可能とした。L 字型で実験は行ったが、マーカ平

面上で3点の位置情報が取得できればL字型以外の形状にも変形可能であり、それにより操作物の形状自由度の向上を実現した。VR マーカは、電子制御不要で汎用操作物に自由形状マーカを印刷するだけでマーカの視覚認識が可能のため、手軽に人の動作をゲームシーンに反映できるVRシステムが想定できた。

次のステップとして、スマートフォンにシステムソフトウェアを実装し、没入VRゲームでの動作検証を行い、VRアクションゲームが、汎用デバイスのみを用いて、誰でも簡単に体験できる仕組みと環境を提供しVR普及の加速に貢献したい。

### 参考文献

- [1] L. Avila, M. Bailey “Virtual Reality for the Masses”  
IEEE Computer Graphics and Applications 0272-1716 IEEE  
Computer Society 2014, pp. 103-104.
- [2] Google. Google Cardboard, <https://cardboard.withgoogle.com/>, 2015
- [3] W. Piekarski., B.Thomas, “Using ARToolKit for 3D hand position tracking in mobile outdoor environments”,  
Augmented Reality Toolkit, The First IEEE International Workshop, 2002, pp.102.
- [4] G. Marin, F. Dominio, P. Zanuttigh,,” Hand gesture recognition with leap motion and kinect devices” Image Processing (ICIP), IEEE International Conference 2014 pp.1565-1569.
- [5] Sony Computer Entertainment, PlayStation,  
<http://www.jp.playstation.com/> 2015.
- [6] Nintendo, Wii, <http://www.nintendo.co.jp/wii/> 2015.
- [7] A. Kimura et al: United States Patent, No: US 8,113,432 B2, Feb 2012.
- [8] B-Core Inc. Colorbit Reference,  
[http://www.colorbit.jp/en/wp-content/uploads/2010/05/colorbit\\_reference\\_EN2.pdf](http://www.colorbit.jp/en/wp-content/uploads/2010/05/colorbit_reference_EN2.pdf), 2015.
- [9] D. Hoiem, “Projective Geometry and Camera Models”,  
Computer Vision CS 543 / ECE 549 University of Illinois Jan, 20, 2011, pp. 1-57.
- [10] The OpenCV Reference Manual Release 2.3 October 15, 2011 [www.opencv.org](http://www.opencv.org).
- [11] R. Brannon, “A review of useful theorems involving proper orthogonal matrices reference to three-dimensional physical space”, May 9, 2002, pp. 1-167.