

正確で直感的なカメラ操作を可能とする両手を用いた自由視点映像  
撮影インタフェース\*渡邊 哲哉<sup>†</sup> 北原 格<sup>†a)</sup> 亀田 能成<sup>†</sup> 大田 友一<sup>†</sup>An Accurate and Intuitive Camera Control Interface for Capturing 3D  
Free-Viewpoint Video by Using Bimanual Operation\*Tetsuya WATANABE<sup>†</sup>, Itaru KITAHARA<sup>†a)</sup>, Yoshinari KAMEDA<sup>†</sup>,  
and Yuichi OHTA<sup>†</sup>

あらまし 自由視点映像を撮影する仮想カメラを、正確かつ直感的に操作するためのインタフェースを提案する。両手を用いて三次元的にカメラの位置・姿勢を入力することにより、身体性を活用した直感的な操作が可能となる。カメラ操作を行うスペースの下方に、撮影シーンの状況を表すアイコンを重畳した俯瞰映像を提示することにより、状況に応じた被写体と仮想カメラの適切な位置関係の把握が容易となり、正確なカメラ操作が実現される。提案手法を実装した自由視点映像撮影インタフェースを用いた評価実験を実施し、提案手法の有効性を検証した。

キーワード 自由視点映像, 撮影視点操作, 三次元操作, 俯瞰映像, インタフェース評価

## 1. ま え が き

本論文では、自由視点映像を撮影する仮想カメラを正確かつ直感的に操作することを目的としたインタフェースを提案する。コンピュータの処理能力の向上や映像技術の発展を背景に、複数視点で撮影した多視点映像を計算機内部で統合し、任意の視点からの見え方を再現する自由視点映像の研究が盛んに行われている[1]~[5]。自由視点映像技術を用いた映像配信システムでは、視聴者が好みの視点を自由に選択することが可能である。

Koyamaらは、サッカースタジアムのような大規模空間で行われるイベントに自由視点映像技術を適用することにより、従来の撮影技術では獲得が困難であった撮影対象空間の内部から撮影したような映像や、上空から全体を俯瞰した映像の再現が可能となることに注目し、自由視点映像ライブ中継システムを提案して

いる[6]。図1に示すように、選手追跡用に設置されたカメラを用いて選手の三次元位置を推定すると同時に、テクスチャ撮影用多視点カメラを用いて選手領域のテクスチャを獲得する。推定した選手位置にビルボードを設置し、そこに撮影したテクスチャをマッピングすることにより、選手の三次元モデルを生成する。視聴者から入力される仮想カメラの位置・姿勢情報に対して、三次元モデルを用いて適切な見え方を再現することにより、自由視点映像が生成・提示される。選手形状を平面で近似するため、計算コスト・データ量を大幅に削減し、撮影から提示までの実時間処理が実現可能である。

自由視点映像の生成法については、上述した人物ビルボードを用いる手法以外にも、視体積交差法などによって三次元モデルを生成する手法[1],[2]、Visual Hullを用いて陽に三次元形状を推定することなく自由視点映像を生成する手法[3]や、撮影空間の光線情報を再構成する手法[4]、多視点映像の内挿処理により任意視点からの見え方を生成する手法[5]など、活発な研究開発が行われている。その一方、自由視点映像を撮影する仮想カメラの位置・姿勢をどのように設定・制御すべきか、という議論に対する系統立った研究は、

<sup>†</sup> 筑波大学大学院システム情報工学研究科, つくば市  
Graduate School of Systems and Information Engineering,  
University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, 305-  
8573 Japan

a) E-mail: kitahara@image.iit.tsukuba.ac.jp

\* 本論文はシステム開発論文である。

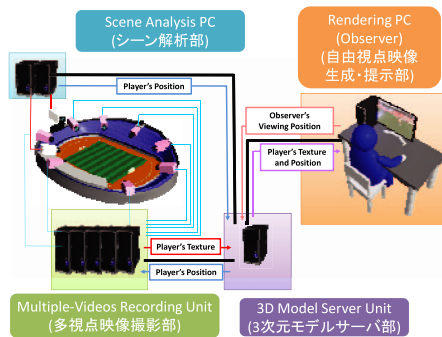


図 1 Koyama らの自由視点映像ライブ中継システム  
Fig. 1 Overview of Koyama's live 3D video display system.

これからの展開が待たれている状態である。

サッカーの試合のように大規模空間において比較的長時間にわたり開催されるイベントを対象に自由視点映像を生成するためには、移動する撮影対象を安定してフレーム内に収めるカメラ操作を正確かつ直感的に実現可能なインタフェースを開発し、撮影者の負荷を軽減することが肝要である。我々は、両手を用いて三次元的にカメラの位置・姿勢を入力することにより、身体性を活用した直感的な操作が可能となる仮想カメラ操作方式を提案する。カメラ操作を行うスペースの下方に、撮影シーンの状況を表すアイコンを重畳した俯瞰映像を提示する機能を有することにより、シーン状況に応じた被写体と仮想カメラの適切な位置関係の把握が容易となり、結果として正確なカメラ操作を実現可能という特長を有する。自由視点映像において仮想カメラを操作するユーザは、映像を鑑賞する視聴者と映像を撮影するカメラマンに大別されるが、本論文で提案する手法の特長は、後者のカメラ操作に注目して考案されたものである。

以下本論文は、2. で仮想カメラ操作の関連研究を紹介し、提案インタフェースの設計方針について述べる。3. では提案インタフェースの実現法、4. では比較実験を実施する環境やインタフェースの実装方法について述べる。5. で提案手法と既存手法との比較実験を行った後、6. でまとめを行う。

## 2. 関連研究

前章で紹介した Koyama らの自由視点映像ライブ中継システムでは、マウスやジョイスティックなど、上下左右の二次元移動とボタン入力のコラボレーションによって仮

想カメラの位置・姿勢を操作する二次元デバイスを用いた操作インタフェースが採用されているが、回転・平行移動の 6 自由度をもつ仮想カメラを思いどおりに操作できるようになるまでには習熟を要するといった問題が存在し、シーンの状況が刻一刻と変化するサッカーの試合において、視聴者が希望する視点からの映像を撮影し続けることは困難である。

Inamoto らは、HMD (Head Mounted Display) を用いて、現実空間に設置した模型上に選手の自由視点映像を重畳提示する没入型提示手法を提案している [7]。視聴者が仮想化空間を観察しながら仮想カメラを制御するため、シーンの状況に応じたカメラ操作が可能であるが、カメラ操作がユーザ頭部の可動範囲や移動速度の制限を受けるといった問題が存在する。ここでいうシーンに応じたカメラ操作とは、撮影シーンの状況を把握した上で、そのシーンを撮影するにふさわしい状態にカメラを操作することを意味する。サッカーの試合を例にとると、ゴール前で選手がボールを持ったシーンでは、シュート動作を想定して、その選手とゴールが写り込む位置にカメラを移動させるケースや、敵陣深くにパスを蹴り出すシーンでは、カメラの光軸がオフサイドラインと平行になるように位置・姿勢を操作することにより、オフサイド判定を楽しむケースが考えられる。

Eyeball-in-hand メタファは、カメラを手に持った状況を仮想的に再現し、その位置・姿勢を直感的に入力可能なカメラ操作法である。平面上を移動する物体を俯瞰的に撮影する場合に有効であることが知られ [8]~[11]、仮想空間におけるカメラ操作方式として広く用いられている [12]~[14]。橋本らは Eyeball-in-hand メタファの長所を自由視点映像の撮影に応用した仮想カメラ操作インタフェースである箱庭スタジアムを提案している [15]。箱庭スタジアムとは、拡張現実感技術 [16] を用いて、仮想化したサッカースタジアムを机の上に重畳提示し、観察者が手に持った小型カメラを仮想カメラの観察視点に見立てて動かすことにより、自由視点映像を撮影する手法である。二次元デバイスを用いたインタフェースに比べ、直感的に視点位置の指定が可能であり、没入型提示手法に比べ、自由なカメラワークが実現可能である。しかし、小型カメラを向ける先が単なる机であるため、観察者は撮影されたシーン映像を手掛りとして仮想カメラを操作しなければならない。また、注視すべき三次元位置を指定することが困難であるため、移動する撮影対

表 1 カメラ操作手法の比較

Table 1 A comparison table for ordinary camera control methods and proposed method.

	2次元 入力デ バイス	没入型 提示手 法	箱庭スタ ジウム	提案 方式
(1)直感的な操作	×	○	○	○
(2)安定した 追跡操作	×	×	△	○
(3)シーン状況に応 じたカメラ操作	×	○	×	○

象を安定してフレーム内に収めることが難しいという Eyeball-in-hand メタファの短所による問題が存在する。

従来手法の長所・短所を表 1 にまとめる。従来研究において、快適な自由視点映像の撮影を実現するために仮想カメラ操作に施された工夫は、(1) 直感的な仮想カメラ操作、(2) 注目対象を安定してフレーム内に収め続ける追跡撮影操作、(3) シーンの状態に応じたカメラ操作の 3 点であることが分かる。これらの知見に基づき、本提案手法は、人間の器用な手を用いて仮想カメラを操作する Eyeball-in-hand メタファ方式の長所を活用することにより、(1) 直感的な仮想カメラ操作を実現する。更に、仮想カメラの視点位置と注視点位置を両手で独立に操作することにより、Eyeball-in-hand メタファ方式の短所を解決し、(2) 注目対象を安定にフレームに収めながら追跡撮影操作が可能である。また、仮想カメラ操作を行うスペースの下方にシーン状況を表すアイコンを重畳した撮影空間の俯瞰映像を提示することにより、没入型提示手法のよう (3) に撮影シーンの状況に応じたカメラ操作を実現する。

### 3. 正確で直感的なカメラ操作を可能とする自由視点映像撮影インタフェース

#### 3.1 撮影インタフェースの概要

提案するインタフェースは、図 2 に示すように三次元位置センサとマーカー、自由視点映像提示ディスプレイ、フィールド俯瞰映像提示ディスプレイで構成される。三次元位置センサのマーカーを二つ用意し、各マーカーを仮想カメラの視点位置と注視点位置に割り当てる。フィールド俯瞰映像提示ディスプレイには、自由視点映像技術を用いて生成したフィールドを真上から見下ろした映像に、選手やボールの位置を示すアイコンを

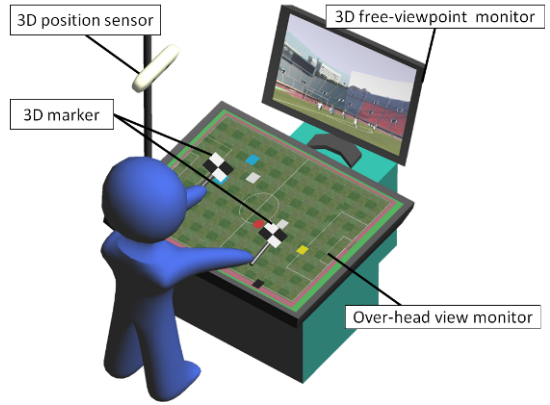


図 2 提案インタフェース

Fig.2 Proposed 3D free-viewpoint video capturing interface.

重畳し提示する。

撮影者は、フィールド俯瞰映像を観察し、シーンの状況や注目対象の存在位置を容易に理解することができる。ボールや選手を追跡撮影したいときには、そのアイコンの動きに沿って注視点マーカーを移動させることにより、安定してフレーム内に収めることができる。ある選手が周囲を見回すような映像は、選手の位置に視点位置マーカーを移動させ、注視点位置マーカーをその周囲で移動させることにより撮影することができる。

#### 3.2 仮想カメラ操作

本方式では、三次元位置センサを用いて計測した二つのマーカーの三次元位置から、カメラの三次元空間での位置と姿勢（パン・チルト）の五つのパラメータを求めることにより仮想カメラを操作する。カメラ位置マーカーをカメラの光軸周りに回転させることにより、カメラのロールを制御することも可能であるが、視聴者のカメラ操作を簡易化するとともに、生成映像による映像酔いの影響を取り除くために、光軸周りの回転（ロール）は発生しないこととする。

##### 3.2.1 マーカーの三次元位置の獲得

提案インタフェースでは、三次元位置センサを用いてマーカーの三次元位置を計測する。提案インタフェースの基準となるフィールド座標系  $C_f = (X_f, Y_f, Z_f)$  は、図 3 に示すように、フィールドに向かって右下の角を原点とし、ゴールラインを  $X$  軸、サイドラインを  $Y$  軸、高さ方向を  $Z$  軸とする。一方、マーカーの計測値は、三次元位置センサ中心を原点とした三次元位置センサ座標系  $C_c = (X_c, Y_c, Z_c)$  で記述される。フィールド座標系の原点とするフィールドの頂点  $\gamma$ 、頂点  $\gamma$

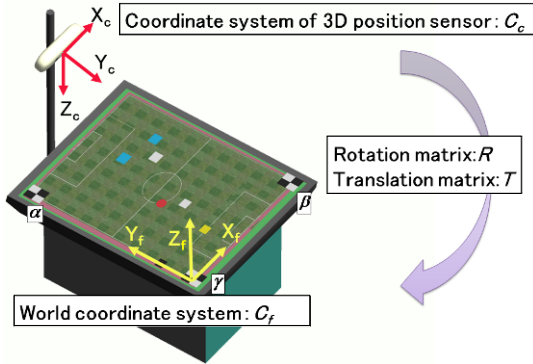


図3 フィールド座標系  $C_f$  とセンサ座標系  $C_c$  の関係  
Fig. 3 Geometrical relationship between  $C_f$  and  $C_c$ .

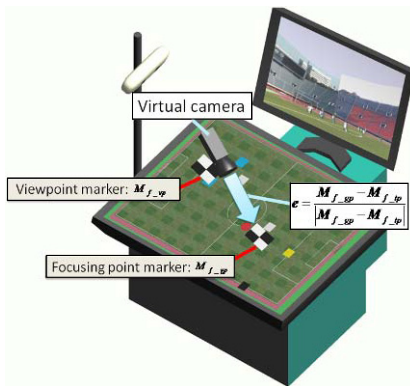


図4 仮想カメラの位置・姿勢の算出  
Fig. 4 Calculating position and orientation of a virtual camera.

と交わるゴールラインの反対側の頂点  $\beta$ 、頂点  $\gamma$  と交わるサイドラインの反対側の頂点  $\alpha$  にマーカーを配置し、それらの計測値を用いて、三次元位置センサ座標系  $C_c$  からフィールド座標系  $C_f$  への剛体変換行列を算出する。

### 3.2.2 仮想カメラの位置・姿勢の算出

図4に示すように、仮想カメラの視点位置は  $C_f$  における視点位置マーカー  $M_{f-vp}$  として求まる。仮想カメラの姿勢は、フィールド座標系  $C_f$  における注視点位置マーカー  $M_{f-gp}$  から  $M_{f-vp}$  に向かう正規化された方向ベクトルとして与えられる。

### 3.2.3 仮想カメラ操作時の手ぶれ補正

マーカーの三次元位置計測処理において、マーカーを把持する手の揺れや、照明のちらつきによって計測誤差が生じ、仮想カメラの位置が細かく振動した映像が生成される。そこで、過去  $k$  フレームで観測されたマ

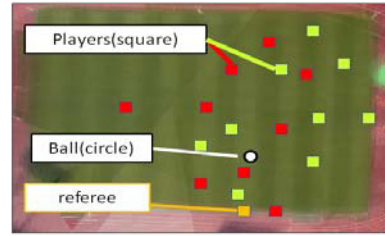


図5 シーン状況理解を支援するフィールド俯瞰映像  
Fig. 5 Overhead-view: positions of ball/players are displayed with circle/square icons colored by team.

カの三次元位置を保持し、式(1)を用いて計測値の平滑化を行い、仮想カメラの揺れを軽減する。

$$\left\{ \begin{array}{l} M_c(k) = \frac{\sum_{n=0}^5 mask(k-n) \cdot M_c(k-n)}{\sum_{n=0}^5 mask(k-n)} \\ |M_c(k) - M_c(k-1)| > th \\ M_c(k-1) \\ |M_c(k) - M_c(k-1)| < th \end{array} \right. \quad (1)$$

ここで、 $mask(k-n)$  は過去の  $k$  フレームの三次元位置の重み付けを行う関数であり、例えば、 $mask(k-1) = 1/2 \times mask(k)$  などとする。 $M_c$  はマーカーの三次元位置、 $k$  は現在のフレーム番号、 $th$  はしきい値である。 $th$  は、環境依存のパラメータであるが、本システムでは、マーカーを把持した状態で一定時間静止させる予備実験を実施し、手ぶれ計測値の平均値と分散から手ぶれモデルを生成し  $3.9\text{mm}$  とする。

### 3.3 フィールド俯瞰映像の生成・提示

カメラ操作を行う空間の下方には、シーン状況の理解を支援するフィールド俯瞰映像を提示する。このフィールド俯瞰映像には、図5に示すように、撮影映像から推定した選手・審判[17]やボール[18]の位置を四角形や円形の色分けされたアイコンで提示する。観察者は、映像中のアイコンを確認することによって、シーンの状況を把握し、それに応じたカメラ操作を行うことができる。例えば、フィールド俯瞰映像中の注目選手やボールのアイコン上に注視点位置マーカーを移動させるといった簡単な操作により、注目対象を瞬時に撮影フレーム中央に捉えることが可能となる。

## 4. 仮想カメラ操作インタフェースの実装

提案インタフェースの有効性を調査するために、提案インタフェース、比較対象とする二次元デバイスを



用いたカメラ操作インタフェース, Eyeball-in-handメタファを用いたカメラ操作インタフェースを実装した。インタフェースの違いに着目した評価実験を実施するために、計算処理を行うPCや映像提示ディスプレイは、表2に示す共通の機材を使用する。自由視点映像の生成から提示の処理はKoyamaライブ中継システムを導入し、提示フレームレートは30 [fps]である。

4.1 提案インタフェースの実装

三次元位置センサとしてClaron Technology社製のMicron Tracker (Sx60) [19]を用いる。Micron Trackerは、図6に示すような格子状のビジュアルマーカをステレオ視することにより、マーカの三次元位置を計測精度0.25 mmRMS、サンプリング周波数48 Hzで計測する。仮想カメラの移動範囲は、三次元位置センサの計測範囲に限定されるため、図7に示すように、ユーザが両手を広げた場合でも視点位置マーカと注視点位置マーカが計測範囲内に収まるよう、システム使用環境を俯瞰する位置に三次元位置センサを取り付ける。最短の観察距離(視点位置マーカと注視点位置マーカの距離)は、マーカのサイズによって決定される。本インタフェースの場合30 mmであるが、実際のサッカーフィールド上での距離に換算すると約

6 mとなる。

実装した提案インタフェースの概観を図7に示す。提案インタフェースでは、視点位置用と注視点位置用のマークスティックを両手で持ち、それらを三次元位置センサで計測し、仮想カメラの位置・姿勢を算出する。仮想カメラからの見え方を再現した映像を自由視点映像提示ディスプレイ  $D_f$  に提示する。この際、画面が上を向くように設置したディスプレイ  $D_b$  にフィールド俯瞰映像を提示することにより、シーンの状況に応じた正確な仮想カメラ操作を可能とする。

4.2 Eyeball-in-handメタファを用いたカメラ操作インタフェース

提案手法のマーカの配置を変更することにより、Eyeball-in-handメタファを用いたカメラ操作インタフェースを実装する。図8に示すように、視点位置マーカと注視点位置マーカを一つのスティックに取り付ける。このマーカ部分を仮想カメラと見立て、スティックの三次元位置とその姿勢を推定し仮想カメラを制御する。図9に片手で仮想カメラを操作している様子を示す。

表2 実験で使用した機材  
Table 2 Equipments used for the experiments.

機材	名称	仕様	
PC	Dell DIMENSION9200	CPU	Intel Core2Duo 2.13GHz
		MEMORY	3.0GB
フィールド俯瞰映像提示ディスプレイ	三菱 LDT322V	有効表示領域	697.7×392.2mm
		解像度	1366×768(WXGA)
		応答速度	6.5ms
自由視点映像提示ディスプレイ	BenQ E2400HD	有効表示領域	531.3×298.8
		解像度	1920×1080(HD1080)
		応答速度	5ms
3次元位置センサ	Micron Tracker Sx60	計測領域	1150×700×550mm
		解像度	640×768
		サンプリング	48Hz

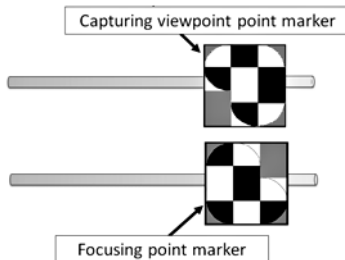


図6 提案手法で用いるマーカのスティック

Fig. 6 The stick with a marker used in our proposed method.

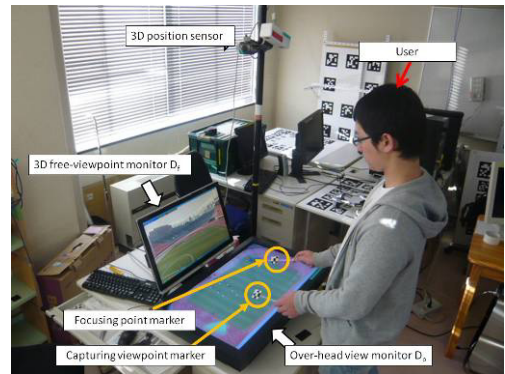


図7 提案インタフェースを実装した様子

Fig. 7 A pilot system of our proposed method.

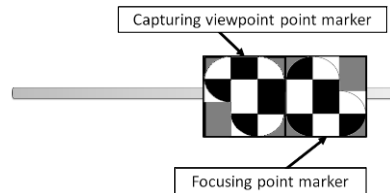


図8 Eyeball-in-handメタファで用いるスティック

Fig. 8 The stick with two markers used as the Eyeball-in-hand metaphor.

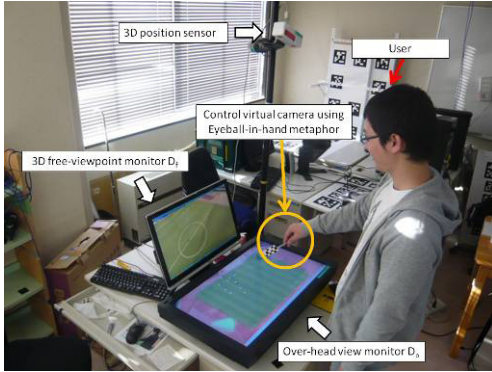


図 9 Eyeball-in-hand メタファを用いた実装例

Fig. 9 A pilot system using Eyeball-in-hand metaphor.

表 3 マウスインタフェースの操作

Table 3 Operation procedures of mouse interface.

操作	カメラの動き
右クリック+マウス移動	フィールド平面と平行な面上での仮想カメラの平行移動
左クリック+マウス移動	注視点位置を画面中心とした半球面上の移動
センターボタン+マウス移動	ズーム

#### 4.3 二次元入力デバイスを用いたカメラ操作インタフェースの実装

今回の評価実験では、二次元入力デバイスとしてマウスインタフェースを用いる。マウス入力とカメラ操作の対応は、表 3 に示すように、汎用 CG ビューワで採用されているボタンと二次元移動の組合せによって実現する。

#### 4.4 仮想カメラの制御精度

仮想カメラの制御精度に関して検証する。カメラの三次元位置の制御精度は、三次元位置センサの計測精度に依存するが、上述した Micron Tracker (Sx60) を用いた場合、 $0.25 \text{ mmRMS}$  である。

カメラの姿勢（パン・チルト）の制御精度は、提案手法では、カメラの三次元位置と注視点の三次元位置を結ぶベクトルとして姿勢を推定するため、三次元位置センサの計測精度と両地点間の距離に依存する。上述した Micron Tracker の位置計測精度と、人が両手でマーカーを操作することを想定したカメラと注視点間の平均的な距離  $750 \text{ mm}$  から算出される、姿勢制御精度は  $3.3 \times 10^{-4} \text{ (rad)}$  である。一方で、従来手法の一つである Eyeball-in-hand メタファを用いた手法は、図 8 に示すように、視点位置マーカーと注視点位置マーカーを一つのスティックに取り付けることにより実現しているが、この場合の姿勢制御精度は  $8.3 \times 10^{-3} \text{ (rad)}$

となる。マウスインタフェースの場合、パン・チルトの制御精度は、マウスポインタが移動する画面の解像度に依存する。本実験で使用した  $1920 \text{ 画素} \times 1080 \text{ 画素}$  のモニタの場合の姿勢制御精度は  $1.6 \times 10^{-3} \text{ (rad)}$  である。以上の結果より、提案手法は、従来手法よりも高い姿勢の制御精度を有することが分かる。

次に、カメラの姿勢を制御してサッカー選手を追尾撮影する際に必要な制御精度について考える。例えば、サッカーフィールドを時速  $20 \text{ km}$  で走行移動する選手を毎秒 30 枚撮影可能なカメラで撮影する場合、三次元空間中での選手の移動距離は  $200 \text{ mm/フレーム}$  である。提案手法では 200 分の 1 に縮小したサッカーフィールドを俯瞰映像として提示するため、画面上での移動距離は  $1 \text{ mm/フレーム}$  となる。その速度で移動する物体を  $750 \text{ mm}$  離れた仮想カメラで追尾撮影する場合、1 フレーム当りの移動角度は  $1.3 \times 10^{-3} \text{ (rad)}$  であるが、先に求めた提案手法の制御精度はこれよりも十分に高い値であることが分かる。

## 5. カメラ操作性能の評価実験

### 5.1 実験の目的と事前準備

提案インタフェースの有効性を調べるために、従来手法との比較実験を実施する。実験内容は、画面に写っていない物体を発見してフレームに収める“検索性能”の評価と、移動する対象物体をフレームに収め続ける“追跡性能”の評価の 2 種類である。なお、本実験における撮影対象は単一物体とする。サッカーの試合では、映像中に複数の物体が写り込むケースが発生するが、そのような状況におけるカメラ操作では、仮想カメラの位置・姿勢操作のほかに、複数の対象を画面のどの位置に捉えるのか、どの範囲に存在する被写体までを撮影するののかという、ズーム操作を伴うフレーミング処理が発生する。本論文で提案するインタフェースの目的は、仮想カメラの位置・姿勢を直感的で正確に操作することであるため、撮影対象を単一物体とすることにより、上記二つの問題を切り分けた評価実験を実施する。

提案手法の特性を明らかにするために、前章で実装した 2 種類の仮想カメラ操作インタフェースとの比較実験を行う。マウスインタフェースとの比較では、俯瞰映像の有無により、検索性能、追跡性能にどのように差が出るのかを検証する。Eyeball-in-hand メタファを用いた仮想カメラ操作方式との比較では、両手で仮想カメラの視点位置・注視点位置を個別に操作す



図 10 人物を正面からフレームに収めた例

Fig. 10 An example image of the front view of a person.

表 4 検索実験の結果

Table 4 Results of evaluation of retrieval capability.

水準 1	水準 2	P 値	判定
マウス	Eyeball-in-hand メタファを用いた手法	0.0439	*
マウス	提案手法	0.0001	**
Eyeball-in-hand メタファを用いた手法	提案手法	0.0101	*

ることの影響を検証する。

評価実験では、日常的にコンピュータを利用し、マウス操作に慣れている被験者 15 名を対象とし、実験内容を理解してもらうことと、個々の操作習熟度の差を軽減することを目的として、実験開始前に 5 分間の練習時間を設ける。

## 5.2 検索性能の比較実験

### 5.2.1 実験内容

検索性能を検討するために、三次元空間中に配置した人物モデルを見つけ出し、図 10 のように人物の正面像を一定以上の大きさでフレーム内に収めるというタスクを行う。タスクを完了すると人物モデルは消滅し、そのとき撮影しているフレーム内には写らない場所に新たに出てくる。以降同様の撮影タスクを 1 分間行い、人物モデルを何回フレーム内に収めることができるかを計測する。

### 5.2.2 結果と考察

実験の結果を表 4 と図 11 に示す。クラスカル・ウォリス検定の多重比較を行ったところ、Eyeball-in-hand メタファを用いた方式と提案方式、マウスインタフェースと提案方式の両者で、各々 5% と 1% の有意差があるという結果が得られた。また、マウスインタフェースと Eyeball-in-hand メタファを用いた方式においても 5% の有意差が得られた。

二次元入力デバイスを用いた操作手法は、シーン状況を把握する機能を有さないため、人物モデルが消滅後、ズームアウトして周囲を見渡す操作に時間がか

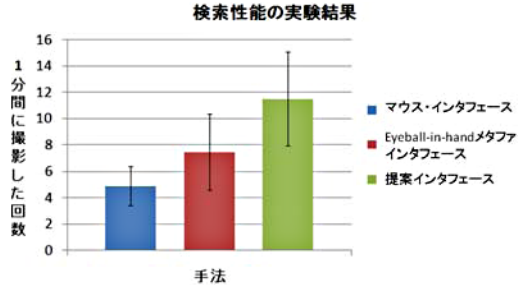


図 11 検索実験の結果

Fig. 11 Results of evaluation of retrieval capability.

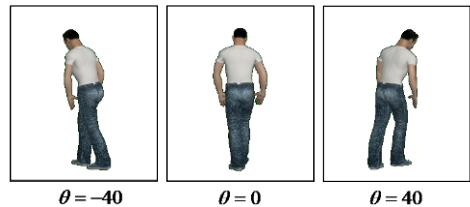


図 12 人物モデルを後方から撮影した映像例

Fig. 12 Person's view from behind.

かった結果であることが考えられる。一方、提案手法では、人物モデルが消滅した場合、俯瞰映像に表示されている人物モデルのアイコンの位置に注視点位置マーカー移動させるだけで、容易に映像中に人物モデルを収めることが可能である。また、Eyeball-in-hand メタファを用いた方式では、人物の正面に回り込む際に注視点位置が追跡対象からずれてしまい、カメラの姿勢を調整する時間が必要となるため、提案手法よりも撮影回数が少なくなっていると考えられる。これらの結果から、提案手法は正確に注目対象を捉える性能を有していることが確認された。

## 5.3 追跡性能の比較実験

### 5.3.1 実験内容

追跡性能を検証するために、生成した自由視点映像中を移動する人物モデルを後ろ側から追跡撮影する実験を実施する。“人物モデルの後ろ側”が真後ろからどの程度ずれることが許容されるかについては、事前に実施した予備実験により左右 40 度とした。人物モデルの真後ろ及び左右 40 度から撮影した映像を図 12 に示す。

式 (9), (10) で算出されるスコアをもとに追跡性能を評価する。人物後方から撮影が行われた場合、人物モデルから仮想カメラの視点位置までの距離の逆数をスコアに加算する。人物モデルの移動パターンは操作

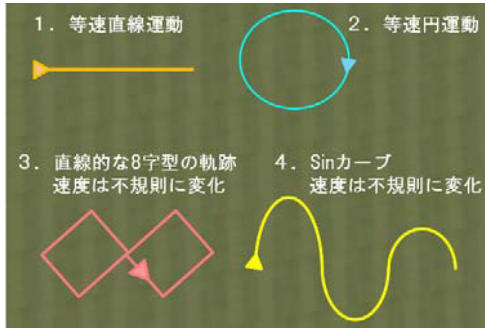


図 13 人物モデルの移動軌跡

Fig. 13 Trajectories of target person's movement.

特性の違いが出るように、図 13 に示す 4 パターンを用いる。また、移動パターンの慣れの影響を軽減するために、注目対象の動きはあらかじめ被験者に提示している。ここでいう移動パターンの慣れの影響とは、動きの軌跡を記憶することにより追跡対象を捕そくしやすくなることによる評価値の変化のことを意味する。本評価実験では、同一の軌跡を移動する被写体に対して、仮想カメラの操作方法を変更しながら実験を進めるため、実施順による操作方式の有利・不利を軽減する必要がある。そこで移動パターンを被験者に覚えてもらう事前練習を行っている。

$$score = \frac{\sum F_{total} score_f}{F_{total}} \times 100 \quad (2)$$

$$score_f = \begin{cases} \frac{1}{|P_{ball} - P_{viewpoint}|} & |\theta| \leq 40 \\ 0 & |\theta| > 40 \end{cases} \quad (3)$$

$$score = \frac{\sum F_{total} score_f}{F_{total}} \times 100$$

### 5.3.2 結果と考察

実験の結果を図 14 と表 5 に示す。追跡実験についても、検索実験と同様にクラスカル・ウォリス検定の多重比較を行った結果、検索実験と同様に、パターン 2, 3, 4 において、提案手法とマウスインタフェース、Eyeball-in-hand メタファを用いた手法とマウスインタフェースの間に 1% で有意な差があった。また、パターン 2, 3 において Eyeball-in-hand メタファを用いた手法と提案手法の間に 5% で有意な差があった。これらの結果から、単純に前進するのみで容易に追跡が行えるパターン 1 のような軌跡についてはどの操作手法でも安定した追跡が可能であるが、パターン 2, 3, 4 のような複雑な軌跡を追跡する際には、提案手法や

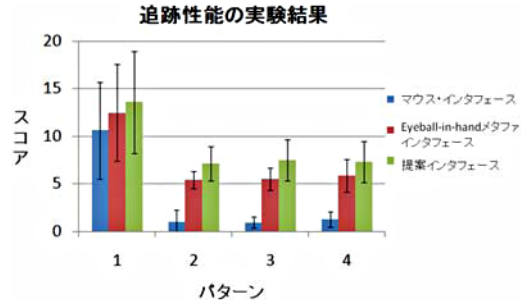


図 14 追跡実験の結果

Fig. 14 Results of evaluation of tracking capability.

表 5 追跡実験の結果

Table 5 Results of evaluation of tracking capability.

パターン	比較対象1	比較対象2	有意性		判定
			P 値	**1%有意 *5%有意	
1	マウス	Eyeball-in-handメタファを用いた手法	0.5536		
	マウス	提案手法	0.2921		
	Eyeball-in-handメタファを用いた手法	提案手法	0.7725		
2	マウス	Eyeball-in-handメタファを用いた手法	0.0002	**	
	マウス	提案手法	0.0003	**	
	Eyeball-in-handメタファを用いた手法	提案手法	0.0352	*	
3	マウス	Eyeball-in-handメタファを用いた手法	0.0000	**	
	マウス	提案手法	0.0000	**	
	Eyeball-in-handメタファを用いた手法	提案手法	0.0204	*	
4	マウス	Eyeball-in-handメタファを用いた手法	0.0000	**	
	マウス	提案手法	0.0000	**	
	Eyeball-in-handメタファを用いた手法	提案手法	0.1881		

カメラメタファを用いた手法のように、入力装置と仮想カメラの動きが直感的に一致している方評価が高くなることが確認された。また、Eyeball-in-handメタファを用いた手法と提案手法の間では、パターン 2, 3 において有意差があり、パターン 1, 4 では提案手法のスコアが高いという結果から、注視点位置を直接指定できる提案手法の有効性が示された。パターン 4 において有意な差が出なかった要因としては、人物モデルの進行方向が変化する時間がパターン 2, 3 と比較すると短時間であるため、Eyeball-in-handメタファを用いた手法でも注視点位置の微調整の時間が短くて済んだことが考えられる。これらの結果から、提案手法が、より直感的に人物の動きに対応して追跡撮影が可能であることが確認された。

複数の対象が存在しているシーンを撮影する場合、仮想カメラの位置・姿勢操作の前段階として、撮影対象を選択する処理が必要となる。提案手法は、5.2 で実施した実験から示されるように、俯瞰映像の導入に



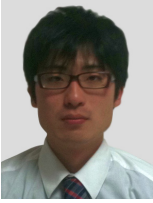
よって得られる高い検索性能を有するため、シーン状況に適した撮影物体を効果的に選択することが可能になることが期待される。

## 6. む す び

本論文では、自由視点映像を撮影する仮想カメラを正確かつ直感的に操作することを目的としたインタフェースを提案した。手にもった二つのマーカの三次元位置を三次元位置センサで検出し、それぞれを仮想カメラの視点位置と注視点位置に割り当てることにより、直感的なカメラ操作を可能とした。また、選手やボールの位置、チーム情報などをアイコンで重畳したフィールド俯瞰映像を操作空間の下方に提示することにより、シーンの状況を把握し、それに応じた撮影を可能とした。提案インタフェースの性能を検証するために、従来の仮想カメラ操作インタフェースとの比較実験を実施した。検索性能の比較実験では、シーン状況を可視化するフィールド俯瞰映像により、注目対象を見失った状況でも、注目対象を正確に再捕そくできることが確認された。また、追跡性能の比較実験では、両手を用いて視点位置と注視点位置を同時に指定することにより、より直感的に移動人物の追跡撮影が可能になることが確認された。これらの実験結果から提案手法の有効性を確認した。

## 文 献

- [1] T. Kanade, P. Rander, and P.J. Narayanan, "Virtualized reality: Constructing virtual worlds from real scenes," *IEEE Multimedia*, vol.4, no.1, pp.34-47, 1997.
- [2] W. Matusik, C. Buehler, R. Rasker, S.J. Gortler, and L. McMillan, "Image-based visual hulls," *ACM SIGGRAPH 2000*, pp.369-374, 2000.
- [3] J. Carranza, C. Theobalt, M.A. Magnor, and H.-P. Seidel, "Free-viewpoint video of human actors," *ACM Trans. Graphics*, vol.22, no.3, pp.569-577, 2003.
- [4] 谷本正幸, "自由視点テレビ," 三次元映像フォーラム, vol.15 no.3, pp.17-22, 2001.
- [5] Y. Liu, Q. Dai, and W. Xu, "A point-cloud-based multiview stereo algorithm for free-viewpoint video," *IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics*, vol.16, no.3, pp.407-418, 2010.
- [6] T. Koyama, I. Kitahara, and Y. Ohta, "Live mixed-reality 3D video in soccer stadium," *International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2003)*, pp.178-187, 2003.
- [7] N. Inamoto and H. Saito, "Immersive observation of virtualized soccer match at real stadium model," *International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2003)*, pp.188-197, 2003.
- [8] C. Ware and S. Osborne, "Exploration and virtual camera control in virtual three dimensional environments," *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, vol.24, no.2, pp.175-183, 1990.
- [9] K. Hinckley, R. Pausch, J.C. Goble, and N.F. Kassell, "A survey of design issues in spatial input," 7th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '94), pp.213-222, 1994.
- [10] C. Hand, "A survey of 3D interaction techniques," *Computer Graphics Forum*, vol.16, no.5, pp.269-281, 1997.
- [11] 深津真二, 北村喜文, 正城敏博, 岸野文郎, "カメラの位置と姿勢に対する拘束の付加に基づく多様なカメラの動き制御の分析と検討," *情処学論*, vol.42, no.6, pp.1311-1319, 2001.
- [12] M. Christie<sup>1</sup>, P. Olivier, and J.-M. Normand, "Camera control in computer graphics," *Computer Graphics Forum*, vol.27, no.8, pp.2197-2218, 2008.
- [13] S.L. Stoev, D. Schmalstieg, and W. Straßer, "Two-handed through-the-lens-techniques for navigation in virtual environments," *IEEE Virtual Reality 2002*, pp.285-286, 2002.
- [14] M. Hachet, P. Reuter, and P. Guitton, "Camera viewpoint control with the interaction table," *Virtual Reality International Conference (VRIC 2003)*, pp.41-47, 2003.
- [15] 北原 格, 橋本浩一郎, 亀田能成, 大田友一, "サッカーの自由視点映像提示における気の利いた視点選択手法," *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol.12, no.2, pp.171-180, 2007.
- [16] 加藤博一, Mark Billingham, 浅野浩一, 橋啓八郎, "マーカ追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション," *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol.4, no.4, pp.607-616, 1999.
- [17] 糟谷 望, 北原 格, 亀田能成, 大田友一, "サッカーシーンにおける選手視点映像提示のためのリアルタイム選手軌跡獲得手法," *画電学誌*, vol.38, no.4, pp.395-403, 2009.
- [18] N. Ishii, I. Kitahara, Y. Kameda, and Y. Ohta, "3D tracking of a soccer ball using two synchronized cameras," *Pacific-Rim Conference on Multimedia (PCM2007)*, pp.196-205, 2007.
- [19] [http://www.clarontech.com/measurement\\_products.php](http://www.clarontech.com/measurement_products.php)  
(平成 23 年 5 月 9 日受付, 10 月 2 日再受付)



渡邊 哲哉 (学生員)

2011 筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻博士前期課程了。現在、富士ゼロックス(株)に勤務。在学中は、自由視点映像の生成・提示に関する研究に従事。



北原 格 (正員：シニア会員)

1996 筑波大学大学院理工学研究科了。同年シャープ(株)入社。2000 筑波大学先端学際領域研究センター助手。2003 ATR 研究員。2005 筑波大学大学院システム情報工学研究科講師。2008 同准教授。コンピュータビジョン、複合現実感の研究に従事。2001 本会学術奨励賞。2003 IEEE VR2003 Honorable Mention Award。2009 年度日本 VR 学会論文賞受賞。博士(工学)。



亀田 能成 (正員：シニア会員)

1991 京大・工・情報卒。1996 同大学院博士後期課程認定退学。同年同大学助手。2001-2002 米国 MIT 客員研究員(併任)。2003 筑波大学講師。2004 同大学大学院助教授、現准教授。博士(工学)。複合現実感や知的画像処理、マルチメディア処理等の研究に従事。バーチャルリアリティ学会、情報処理学会、画像電子学会、IEEE 各会員。



大田 友一 (正員：フェロー)

1977 京都大学大学院博士課程了。京都大学情報工学科助手、筑波大学電子・情報工学系講師、カーネギーメロン大学計算機科学科客員研究員、筑波大学電子・情報工学系助教授を経て、1992 同教授。2004 同大学院システム情報工学研究科教授。2009 より、同研究科研究科長。工博。コンピュータビジョン、視覚情報メディア、複合現実感の研究に従事。2008~2009 年度本会理事。2009 年度日本 VR 学会論文賞受賞。パターン認識国際連盟フェロー、情報処理学会フェロー。