

# 戦略解析に基づくビリヤード支援システム

内山 英昭<sup>†</sup> 斎藤 英雄<sup>†</sup>

慶應義塾大学大学院理工学研究科<sup>†</sup>

**概要** – 本システムは、ユーザがハンディカメラを用いて撮影した入力画像からビリヤード台上の球の位置を検出し、力学シミュレーションによって次の戦略として適切な打ち方を算出して、その打ち方に基づく球の挙動を支援情報として提示する。初めにユーザがビリヤード台全体を任意の方向から撮影する。次に、本システムがビリヤード台上における球の座標を算出し、球の配置を解析することで、複数の戦略を提示する。最後にユーザが選択した戦略についての球の挙動を VR 表示、または実際の画像に CG を用いて AR 表示する。

## Strategy Based Pool Supporting System

Hideaki Uchiyama<sup>†</sup> Hideo Saito<sup>†</sup>

Graduate School of Science and Technology<sup>†</sup>

**Abstract** – This paper presents a strategy based pool supporting system which presents the way to hit the ball by considering the ball arrangement. First, our system estimates positions of solid balls from images which are captured using a handy camera moving around the pool table. Next, our system analyzes the behavior of balls after shooting by using physical simulation, and shows some strategies for winning the pool game. After an user choosing one strategy, our system shows the physical behavior of the balls in the captured image by using CG.

### 1 はじめに

ビリヤードとは、キューと呼ばれる長い棒で球を突き、他の球に当ててコーナーにあるポケットに球を落とすというスポーツである。ビリヤードには多くの競技形式があり、世界中の人々に楽しまれている。球をポケットに落とすためには、球を正確に突けるという技術的な能力だけでなく、打つ方向や強さを決めるために球の力学的挙動や配置を解析する能力などを必要とする。特に、球を落とすことができた場合には、連続して球を打つことができるというルールがあるため、連続して球を落とすためには球の配置を考慮しながら打つことが重要となる。しかし、球の配置を解析して打つためには球同士の衝突やクッションにおける反射を考慮する必要がある。初心者にとっては困難であるとともに、上達するための1つのポイントになっている。

従来、ビリヤードにおける打ち方を支援するシス

テムはいくつか提案されている [1][2]。ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いるシステム [1] では、球とポケットを対称性と確率に基づくカラーモデルを用いて抽出、判別を行った。支援情報として、球とポケットを結んだ直線を HMD 上に表示していた。また、カメラ・プロジェクタを用いたシステム [2] においては、カメラをビリヤード台の上部に設置することで、ビリヤード台と球を長方形と円に近似して抽出、判別した。支援情報として、複数の打ち方について、球の軌跡をプロジェクタを用いてビリヤード台の上に投影していた。従来研究においては、機器を装着することでゲームの質感を損ねてしまったり、機器の設置が必要であったりするため、ビリヤードゲームを行う通常環境で用いることが難しいと考えられる。また、支援情報は、ビリヤード台上にあるすべての球の配置を用いて算出したものではなく、ゲーム戦略などを考慮したものではなかった。

本稿では、ポータブルなデバイスを用いたシステ

ムとして、ビリヤード台全体と球をハンディカメラで撮影した画像から球の位置を算出し、球を突いた後の球の挙動を物理シミュレーションを用いて解析し、その解析とゲーム戦略に基づいて得られる支援情報を提示し、撮影している画像中に理想的な球の挙動を重畳表示 (AR 表示) するシステムを提案する [3][4][5].

本システムでは、ユーザがフリーハンドでビリヤード台全体を撮影する。撮影した画像からビリヤード台の長方形の緑マット領域を検出することで画像座標系と世界座標系の対応を表す射影行列を算出する。この射影行列を用いて画像中に撮影されるすべての球に対し、球の画像座標から世界座標系におけるビリヤード台上の球の位置を算出する。算出した球の配置に対し、球に速度を与えて物理シミュレーションを行い、評価関数を用いてシミュレーション後の球の配置の評価する。複数の速度に関してシミュレーションを行って球の配置を評価し、支援情報の候補をユーザに提示する。ユーザが選択した速度について、シミュレーション結果を平面的な動きとして VR 表示する。さらに、ビリヤード台上を撮影しながら画像中に CG を用いて球の挙動を AR 表示する。

このように球を突いてから止まるまでの球の挙動を提示することで、球の配置に基づいたゲーム戦略の検討を支援することができると思われる。

## 2 提案システム

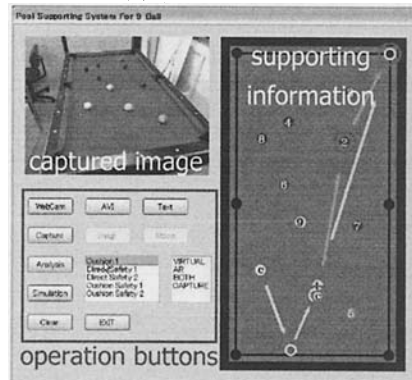
### 2.1 システムの概要

図 1 に本システムの構成とインターフェースを示す。本システムは、ポータブルなデバイスとして図 1 の (a) に示すような USB カメラを装着したタブレット PC を使用する。

初めに、ユーザはビリヤード台の横に立ち、本システムのカメラにビリヤード台全体が収まるように撮影する。このとき、ユーザはビリヤード台に対して任意の位置・方向からビリヤード台を撮影することができる。次に、本システムが球の位置の算出と配置の解析を行い、図 1 の (b) に示すインターフェース上に複数の打ち方を提示する。最後に、ユーザが 1 つの打ち方を選択すると、本システムが球の挙動を VR 表示する。更に実際にユーザがビリヤード台をカメラで撮影しながら、画像中のビリヤード台の上に AR 表示された支援情報を見ることもできる。



(a) タブレット PC



(b) インターフェース

図 1: システムの構成

### 2.2 処理の概要

ユーザがフリーハンドで撮影した画像からビリヤード台上の球の位置の算出を行う。図 2 に入力画像の例を示す。入力画像から球の位置を算出するために、オンラインでカメラキャリブレーションを行うことで画像座標系と世界座標系の対応を表す射影行列をフレーム毎に算出する。本システムは、ビリヤード台の平面性を利用し、平面領域を検出することでカメラキャリブレーションを行う手法 [7] を用いる。ビリヤード台と球の大きさを既知とすると、射影行列を用いて入力画像から球の位置を算出することができる。

次に、算出した球の配置に関して、ゲーム戦略に基づく解析を行う。ビリヤードには、様々な種類の競技がある。その中で、日本で広く楽しまれているナインボールについて、ルールに基づくゲーム戦略の解析を行う。解析方法として、球に速度を与えて物理シミュレーションを行い、ゲーム戦略のために適切な速度を探索し、ユーザに複数の打ち方の候補を提示する。

最後に、支援情報として理想的な球の挙動の提示を行う。ユーザが 1 つの候補を選択した場合、物理

シミュレーションの結果を平面的な動きとして VR 表示する。さらに、ユーザがビリヤード台を撮影しながら、撮影した画像中に CG を用いて球の挙動を AR 表示する。

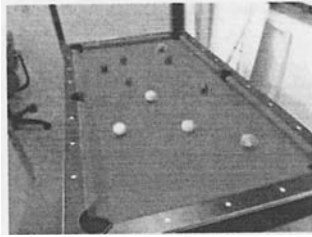


図 2: ユーザが撮影する画像の例

### 3 球の位置の算出

#### 3.1 処理の概要

本システムは、撮影した画像からビリヤード台の球の位置を算出するために、式 (1) に示すように画像座標系  $(x, y)$  と世界座標系  $(X, Y, Z)$  の関係を表す射影行列  $P$  を算出する。射影行列  $P$  を算出する手法として、平面領域を用いた手法 [7] が提案されている。そこで、ビリヤード台の緑マット領域が平面であることを利用して射影行列  $P$  を算出するために、ビリヤード台の平面領域の検出を行う。

次に、画像中における球領域の検出を行う。球は緑マット上に存在するため、緑マット領域内において球領域の検出を行う。球の色は緑マットの色と異なることを利用し、緑マット領域内において緑マットの色以外の領域を球領域として検出する。

式 (1) において、ビリヤード台の球の位置は、世界座標系における  $(X, Y)$  である。そこで、式 (1) を用いて画像座標  $(x, y)$  から球の位置  $(X, Y)$  を算出するために、世界座標系における  $Z$  の値を与えることで球の位置  $(X, Y)$  を算出する。

最後に、各球はそれぞれ異なる色であることを利用して球の識別を行い、各球の位置を算出する。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \sim P \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

#### 3.2 ビリヤード台の平面領域の検出

初めに、射影行列  $P$  の算出のために、ビリヤード台の平面領域の検出を行う。

図 3 の (a) はビリヤード台を撮影した画像の一例である。球が置いてある内側の緑マット領域と周りの枠の緑マット領域は共に平面である。ビリヤード台の平面領域として枠にある緑マット領域を用いるために、内側の緑マットの領域を含めたすべての緑マット領域の抽出する。

初めにテンプレートとして、図 3 の (a) に示すような緑マットの RGB 値を計測しておく。入力画像の各画素の RGB 値に対し、色ベクトルの内角を算出する。色が似ている場合に内角は小さくなり、色が似ていない場合には大きくなるため、内角の大きさによって緑マット領域かどうかを判定する。あらかじめ決定しておいたしきい値によって各画素を分類すると、図 3 の (b) のように緑マット領域のマスクを生成することができる。

次に、図 3 の (c) のようにマスクの輪郭線を抽出して、ハフ変換 [8] を用いて直線群を検出すると図 3 の (d) のようになる。この直線群の中から、四角形を構成する 4 本の辺を検出すると、図 3 の (e) のように緑マット領域を抽出できるとともに、4 つのコーナーを検出できる。

この 4 つのコーナーについて、画像座標と世界座標の対応付けを行うことで、平面領域を用いた手法 [7] から射影行列  $P$  を算出する。

#### 3.3 球領域の算出

射影行列  $P$  を用いて球の位置を算出するために、球領域の抽出を行う。

球は緑マット上に必ず存在する。このため、緑マット領域内において球領域を検出する。球領域の検出は、緑マット領域内において球の候補領域として緑マット以外の領域検出し、その中から球領域のみを検出する。

緑マットのテンプレートの RGB 値と入力画像の各画素の RGB 値に対し、色ベクトルの内角とノルムの差に重みを付けた評価値を算出する。球の中には、緑マットの色に近いものもあり、内角だけではなく、ノルムの差についても考慮することで検出精度を向上させている。各画素の評価値に対して、あらかじめ決定したしきい値を用いて分類することで、図 4 の (b) のような球の候補領域を抽出する。

球の候補領域内には、球以外にポケットやクッションの影などが含まれる。クッションの影の領域は球

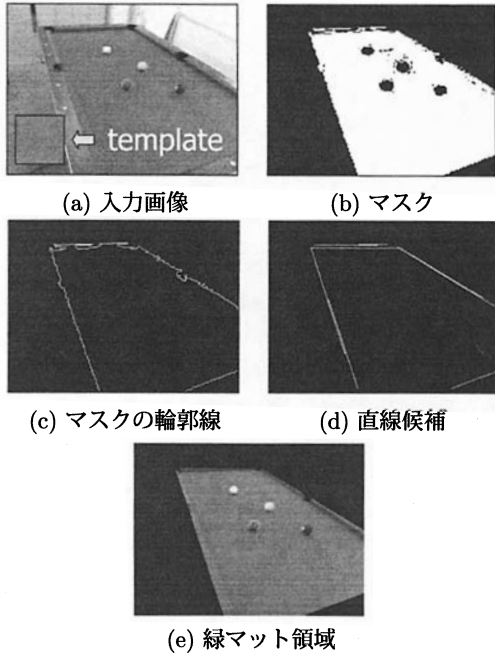


図 3: ビリヤード台の平面領域の算出

の領域に比べて大きいことを利用し、球の領域のみを算出する。各領域に対して面積の大きさによって判別し、図 4 の (c) のように球領域のみを検出する。図 4 の (d) に球領域の検出結果を示す。

### 3.4 球の位置の算出

ビリヤード台上の球の位置は、式 (1) において世界座標系  $(X, Y, Z)$  における  $(X, Y)$  であり、図 5 のように  $Z$  軸はビリヤード台平面に対して垂直方向の軸である。

球の位置  $(X, Y)$  を算出するためには、式 (1) において画像の座標  $(x, y)$ 、射影行列  $P$  と世界座標系における  $Z$  の値が必要である。そこで、ビリヤード台のクッションの高さ  $h$  と球の半径  $r$  を既知とすると、球の中心の  $Z$  座標は  $Z = -(h - r)$  として与えることができる。また、図 5 のように、画像中の円の中心  $w$  と実際の球における点  $W$  を結ぶ直線は球の中心  $C$  を通ると仮定すると、画像中の円の中心の座標  $(x, y)$  を用いることで球の位置  $(X, Y)$  を算出することができる。

### 3.5 球の識別

図 6 の (a) のように、検出した球領域には、球の色以外に球の下部にできる影、鏡面反射成分などが

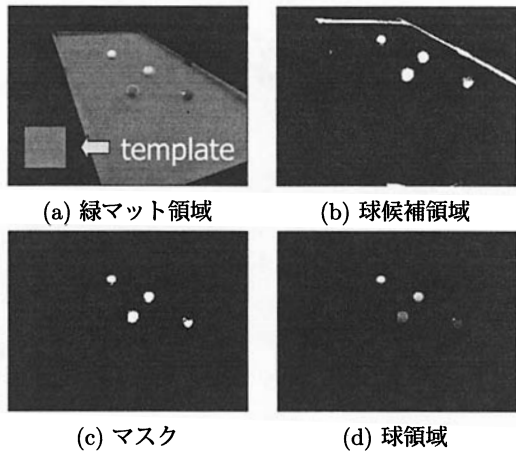


図 4: 球の領域算出

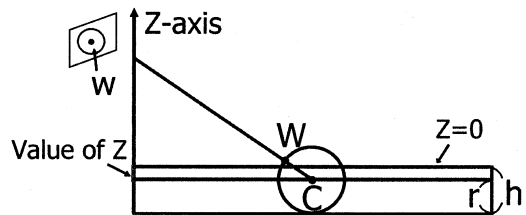


図 5: 球の位置の算出

含まれる。このため、領域内の色の平均を用いると、陰や鏡面反射成分の影響を強く受けるため、誤識別が発生することがある。そこで、球の識別のために表 1 に示すような投票に基づく判別を行う。

初めに、図 6 の (b) のように、各球の RGB 値をテンプレートとして計測しておく。球の領域内の各画素の RGB 値に対し、ビリヤード台の緑マットの領域の抽出の際と同様に、各球のテンプレート値との内角を算出し、内角が最小となる球に投票する。投票を行うと、例えば表 1 のようになる。そして、投票結果が最も多い球の番号が、検出した球領域の球の番号となる。

表 1: 投票に基づく判別

Number	c	1	2	3	4	5	6	7	8
Count	10	0	0	65	0	25	0	0	0





図 6: 球の分類

## 4 球の配置の解析

### 4.1 ナインボール

ビリヤードには様々な種類の競技がある。その中で、日本で最も広まっている競技の1つとしてナインボールがあげられる。ナインボールとは、1番から9番までの的球と1つの手球を使い、番号順に球を落としていく。そして、9番ボールを落としたプレイヤーが勝者となるルールである。本システムは、ナインボールを対象としたゲーム戦略の発想支援を行う。

### 4.2 ゲーム戦略

ナインボールにおいて、勝つためのゲーム戦略を考える場合、番号順に球を落とさなければならないというルールを考慮する必要がある。つまり、1番ボールを落とした場合、続けて2番ボールを落とす必要があるため、1番ボールを落とす際に2番ボールの位置を考えながら打つ必要がある。これをポケットという。

また、ビリヤードのルールには球を落とせなかった場合にはプレイヤーを交代するというルールがある。このルールに基づく戦略として、プレイヤーを交代する際に、相手が打ちにくい球の配置になっていれば、相手も球を入れることができず、再びプレイヤーを交代することができる。つまり、球をポケットに入れることができないと判断した場合には、相手が球を打ちにくい配置になるように打つ必要がある。これをセーフティという。

ナインボールにおけるゲーム戦略を考える場合、ポケットできるかどうか、またどのようにセーフティとなる状態に持ち込むかを判断することが重要となる。そこで、球に様々な速度を与えて物理シミュレーションを行い、ポケットする場合とセーフティをする場合についてそれぞれ適切な速度を探索し、ユーザに複数の戦略を提示する。

### 4.3 物理シミュレーションを用いた探索

物理シミュレーションを行う際、球は質点の運動として、直線運動すると仮定する。シミュレーションの際に考慮するパラメータは以下の通りである。

- 緑マットにおける動摩擦係数
- 球同士の衝突における反発係数
- クッションにおける反発係数

ビリヤードの物理シミュレーションを行う際、回転運動を考慮することで、より現実に近いシミュレーションを行うことができる。しかしながら、本システムではユーザに対する応答をできるだけ早くするために、直線運動のみを考慮した物理シミュレーションを用いている。このため、球をカーブさせて打ったり、ジャンプショットなどについては探索を行わず、ユーザが球の中心部分を直線的に突いて打つ場合について探索を行う。

球の狙い方として、球を直接狙う場合とクッションに1度反射させて狙う場合について探索を行う。球の軌跡を決定した後、球に速度を与えてシミュレーションを行い、シミュレーション後の球の配置を評価する。球の配置を評価する際、球同士の距離や角度に対して重み付けを行い、評価を行う。複数の速度について、シミュレーションを行い、各狙い方において、適切な速度を算出する。

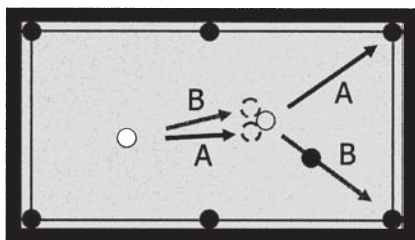
### 4.4 ポケット

ポケットを狙えるかどうかを判断する場合、球の軌跡が存在するかどうかを判別する必要がある。図7において、(a)が直接狙う場合、(b)がクッションを狙う場合を示している。ポケットを狙う場合、直線運動を仮定しているため、的球やクッションに球を当てる場所を一意に決定することができる。

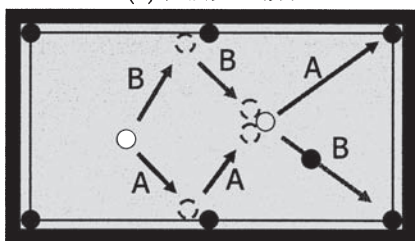
直接狙う場合、図7の(a)に示すように、球の軌跡は手球-的球間-的球-ポケット間が重要となる。図7に示す球の配置の場合、Aの矢印とBの矢印の場合について球の軌跡が存在する。しかしながら、Bの矢印の場合、的球-ポケット間の他の球が軌跡の

障害となるため、狙うことはできない。そこで、Aの矢印の軌跡について、物理シミュレーションを行い、適切な速度を算出する。

クッションを狙う場合、クッションは4つ存在するため、それぞれのクッションを用いた場合について探索を行う。図7の(b)に示すように、球の軌跡は手球-クッション間、クッション-的球間、的球-ポケット間が重要となる。図7の(b)において、Bの矢印のように上部のクッションを用いて的球を狙う場合、入れることのできるポケットは右下のポケットのみとなる。しかしながら、的球-ポケット間の他の球が軌跡の障害となるため、狙うことはできない。また、Aの矢印のように下部のクッションを用いて的球を狙う場合、入れることのできるポケットは右上のポケットのみとなる。この球の軌跡には障害となる球が存在しないため、狙うことができる。そこで、Aの矢印の軌跡について、物理シミュレーションを行い、適切な速度を算出する。同様に、左右のクッションについても、球の軌跡が存在するかどうか探索し、物理シミュレーションを用いて、適切な速度を算出する。



(a) 直接狙う場合



(b) クッションを使って狙う場合

図7: ポケット

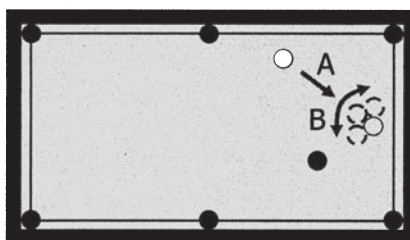
#### 4.5 セーフティ

図8の(a)のような球の配置の場合、的球をポケットに入れることは難しい。的球をポケットに入れることができなかつた場合は、プレイヤーを交代する

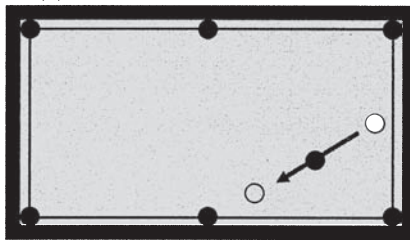
ため、相手が打ちにくい配置になるように打つ必要がある。

図8の(a)の球の配置に対して、Aの矢印の方向に球を打った結果、図8の(b)のようになったとする。図8の(b)の配置では、他の球が障害となって、直接狙うことができない。つまり、セーフティを狙う場合、相手が直接的球を狙うことが難しくなるような配置になることが重要となる。

セーフティの探索において、的球のどの部分に当たっても構わないため、図8の(a)のBの矢印の範囲すべてについて、球を当てる場所として設定し、探索を行う。



(a) セーフティを行う球の配置の例



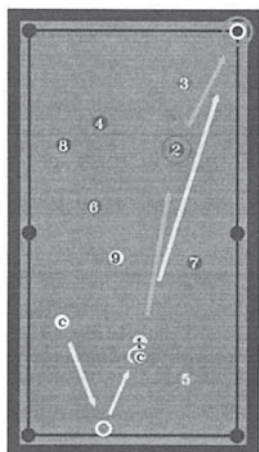
(b) セーフティの結果の例

図8: セーフティ

### 5 支援情報の表示

算出した速度における球の挙動を支援情報として、VR表示とAR表示を行う。図9の(a)は上部から見た場合をVR表示している。一方、図9の(b)は実際にカメラでビリヤード台を撮影し、CGを用いて実画像に重畳表示しており、拡張現実感に基づく表示(AR表示)である。

AR表示を行うためには、初めに図10の(a)のようにビリヤード台上にある球領域を、(b)のようにビリヤード台の色に変えることで背景画像を生成する必要がある。球領域の検出は、球の位置の算出の際と同様にビリヤード台の緑の領域内において、ピ



(a) VR



(b) AR

図 9: VR/AR 表示

ビリヤード台以外の色の領域を検出する。背景画像上で球の挙動を CG を用いて表示するために、画像から射影行列を算出することで球を重畳表示することができる。

球の挙動の AR 表示は、オンラインで行うことができる。すなわち、ユーザが任意の位置から台全体を撮影しながら、画面を通して球の挙動を見ることができる。図 11 の (a) と (b) は、ユーザが視点を変えながら球の挙動を見ていることを表している。

## 6 実験

### 6.1 球の位置の算出精度

提案システムにおける球の位置の算出精度についての検証を行った。手で計測した位置に球を置き、入力画像列から算出した位置との誤差を算出する。ビリヤード台のサイズは  $1330\text{mm} \times 700\text{mm}$  であり、入力画像のサイズは  $320 \times 240\text{pixel}$  である。図 12 に



(a) 入力画像



(b) 背景画像

図 10: 背景画像の生成



(a) 視点 1



(b) 視点 2

図 11: AR 表示

入力画像の例を示す。

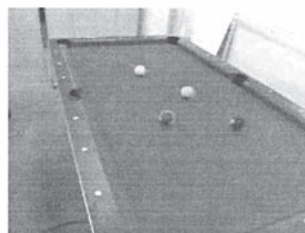


図 12: 入力画像の例

提案システムを用いて複数方向から撮影した 120 枚の入力画像に対して、各画像で算出した球の位置の平均値を求めた。図 13 に手で計測した位置と本システムを用いて算出した位置をビリヤード台上に示す。各正方形が計測した位置であり、各円が算出した位置である。また、表 2 に各球の手動で計測した座標と提案システムを用いて算出した座標を示す。最大誤差は  $18\text{mm}$ 、平均誤差は  $7\text{mm}$  であった。ビリヤード台の短辺  $700\text{mm}$  に対して、誤差  $7\text{mm}$  は  $1\%$  程度となっており、ビリヤードの戦略を検討するために十分な精度が得られたと考えている。

最後に最も誤差の多かった白い球について、各フレームで算出された座標と手で計測した座標の比較を図 14 に示す。各フレームにおける誤差は一定で

表 2: 座標の算出結果 (m)

Color	White		Yellow	
	x	y	x	y
Ground truth	0.373	0.823	0.273	0.573
Result	0.378	0.841	0.274	0.582
Color	Blue		Red	
	x	y	x	y
Ground truth	0.223	0.323	0.423	0.423
Result	0.228	0.317	0.429	0.425

はないことは、ビリヤード台を見る方向によって照明条件などが異なり、ビリヤード台の検出精度が異なることに起因すると考えられる。

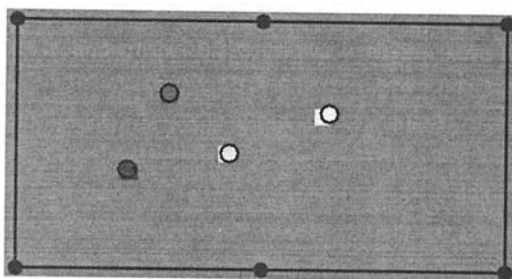


図 13: 計測値と算出値の比較

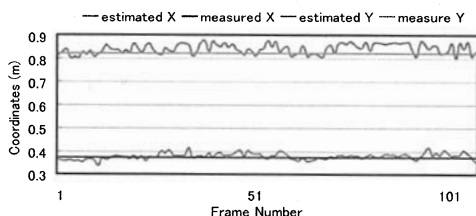


図 14: 各フレームにおける白い球の座標

## 7 おわりに

本論文では、ビリヤード戦略発想支援システムとして、ビリヤード台と球を撮影した画像列から台上の球の位置を算出し、理想的な球の軌跡を撮影している画像中に重畳表示するシステムを提案した。本システムでは、ユーザが任意の方向から台を撮影し

た画像から射影行列を算出することで、球の位置を算出した。また、球領域の検出において、球の影や鏡面反射の影響を受けないようにするために、投票による手法を用いた。更に、支援情報の表示方法として、実際に台を撮影しながら、台上に球の挙動をオンラインで表示した。実験では、球の位置の算出精度がビリヤードの戦略を考えるためには十分な精度であることを示した。

## 参考文献

- [1] T.Jebara, C.Eyester, J.Weaver, T.Starner and A.Pentland: Stochastics: Augmenting the Billiards Experience with Probabilistic Vision and Wearable Computers, Proc. of the International Symposium on Wearable Computers, pp. 138-145, 1997.
- [2] 緒方 祐介, 有田 大作, 谷口 倫一郎: ビリヤードを対象としたプロジェクタ・カメラシステムによる実世界作業支援, 情処研報コンピュータビジョンとイメージメディア, pp.181-188, 2006.
- [3] 内山 英昭, 齋藤 英雄: ハンディカメラ入力からのシーン解析に基づくビリヤード支援用 VR 表示システム, 日本バーチャルリアリティ学会第 11 回大会論文集, pp.442-445, 2006.
- [4] 内山 英昭, 齋藤 英雄: ハンディカメラ入力によるビリヤード戦略発想支援システム, エンタテインメントコンピューティング 2006, pp.77-78, 2006.
- [5] H.Uchiyama and H.Saito: Position Estimation of Solid Balls from Handy Camera for Pool Supporting System, Proc. of the 1th IEEE Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology (Lecture Note in Computer Science 4319, Advances in Image and Video Technology), pp.393-402, 2006.
- [6] H.Kato and M.Billinghurst: Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-Based Augmented Reality Conferencing System, Proc. of the 2nd International Workshop on Augmented Reality, 1999.
- [7] G.Simon, A.W.Fitzgibbon and A.Zisserman: Markerless tracking using planar structures in the scene, Proc. of the International Symposium on Augmented Reality, pp.120-128, 2000.
- [8] L.Xu, E.Oja and P.Kultanen: A new curve detection method: randomized Hough transform (RHT), Pattern Recognition Letters, Vol.11, pp.331-338, 1990.