

## 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

緒方, 祐介  
九州大学システム情報科学研究所知能システム学部門

有田, 大作  
九州大学システム情報科学研究所知能システム学部門

谷口, 倫一郎  
九州大学システム情報科学研究所知能システム学部門

<https://hdl.handle.net/2324/5940>

---

出版情報：情報処理学会研究報告. CVIM, [コンピュータビジョンとイメージメディア]. 2006 (51), pp.181-188, 2006-05. 情報処理学会

バージョン：

権利関係：ここに掲載した著作物の利用に関する注意 本著作物の著作権は（社）情報処理学会に帰属します。本著作物は著作権者である情報処理学会の許可のもとに掲載するものです。ご利用に当たっては「著作権法」ならびに「情報処理学会倫理綱領」に従うことをお願いいたします。

# 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

緒方 祐介<sup>†</sup> 有田 大作<sup>†</sup> 谷口 倫一郎<sup>†</sup>  
九州大学大学院システム情報科学研究科<sup>†</sup>

〒 816-8580 春日市春日公園 6-1

E-mail: {ogata,arita,rin}@limu.is.kyushu-u.ac.jp

あらまし 本研究では、作業内容に習熟していない作業者に手順決定に必要な情報と手順の遂行法を提示する作業支援システムを提案する。具体的な作業にはビリヤードにおける球を穴に入れる作業を扱い、コンピュータビジョンの技術を用い、カメラ画像から人間の介入なしに作業段階を認識し、拡張現実感の技術を用い、プロジェクタによりビリヤード台上に直接的に作業支援情報を提示し、本来の作業を阻害することなく作業支援を行うシステムを開発した。作業支援情報は、手順決定支援情報として4つのショットの打ち筋を提示し、手順遂行支援情報として、キュースティックの向きと位置、打つ強さを提示する。さらに、提案した作業支援システムを用いてショット遂行実験を行い、このシステムの有効性を確認した。

キーワード 画像理解, 拡張現実, 物理世界への働きかけ, 作業支援, カメラ・プロジェクタシステム

## Task supporting system in the real world by a projector-camera system for billiards

Yusuke Ogata<sup>†</sup>, Daisaku Arita<sup>†</sup>, Rin-ichiro Taniguchi<sup>†</sup>

Department of Intelligent Systems

Kyushu University<sup>†</sup>

6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka, 816-8580 Japan

E-mail: {ogata,arita,rin}@limu.is.kyushu-u.ac.jp

**Abstract** We propose a task supporting system which shows beginners information to plan and to execute their task processes. As an example task, we employ ball-pocketing tasks of billiards. The support system recognizes the current task states, i.e., ball and cue stick positions, from camera images using computer vision techniques and shows support information directly on a billiard table by a projector. The system is implemented to projecting target lines of four kinds of shots, cue stick orientation and position, and shot strength information. We have confirmed effectiveness of the system by making preliminary experiments.

**Key words** Image Understanding, Augmented Reality, Action to physical world, Task Supporting System, Projector Camera System

### 1. 研究の背景と目的

「作業」というと物の組み立てや機械の操作を連想する。組み立ても操作もいくつかの工程と手順を踏んで目標を達成するという点では同

じである。そこで、「作業」を複数の工程と手順を実行し、目標を達成するものであると捉えると、スポーツや芸能における技芸習得のための練習過程も「作業」の一種と考えることができる。

本研究では作業内容に習熟していない作業員(以降、未習熟者)に対し、作業段階を自動で認識し手順決定に必要な支援情報と手順遂行法を提示するシステムを提案する。

一般に、未習熟者は「現在の作業段階の認識」と「認識された作業段階に基づいた次の手順の決定」という手順を決定する際の2つの過程を正しく行うことができない。それに加えて「技術不足のため作業を遂行できない」という問題も抱えている。そのため、計算機による作業支援においては、次の手順を決定するための2つの過程を計算機が正しく行い、未習熟者に適切な手順とその遂行法を提示するシステムを構築する必要がある。さらに上記の点に加えて、作業の段階を認識するために必要な情報の獲得方法、作業支援情報の提示方法も重要な問題である。これは、作業の途中で、作業の状態を認識するための情報をわざわざ計算機に入力したり、手順を知るために計算機のディスプレイ装置を参照することは、本来の作業を中断し、別の作業を並行して行わなければならないので、本来の作業の能率が低下するおそれがあるからである。

作業段階を自動で認識するには、作業員が手に持っている道具の種類や、道具と作業員の位置関係、作業全体のなかでどの手順まで完了したかなどの情報が必要となる。道具の認識方法としてRFIDタグを用いる方法が考えられる。RFIDタグを道具に取り付けると作業員が持っている道具の種類や位置関係を認識することができるが、取り付けしたことによる道具の違和感や利便性の低下が生じる。そこで、作業段階を自動で認識するためにカメラを使用し、コンピュータビジョンの技術を用いてカメラ画像から必要な情報を得る。カメラを用いることで人や物体の情報を非接触で獲得することができる。

一方、作業を中断しない作業支援情報の提示法として拡張現実感 (Augmented Reality:AR) の技術を用いる。ARを用いた作業支援ではヘッドマウントディスプレイ (以下、HMD) を用いて、ARを利用して支援情報をどこでも受け取れるようなものが多い。しかし、HMDは利用者への負担が大きく長時間の使用には向かない。そこで本研究では、プロジェクタにより作業空間に直接

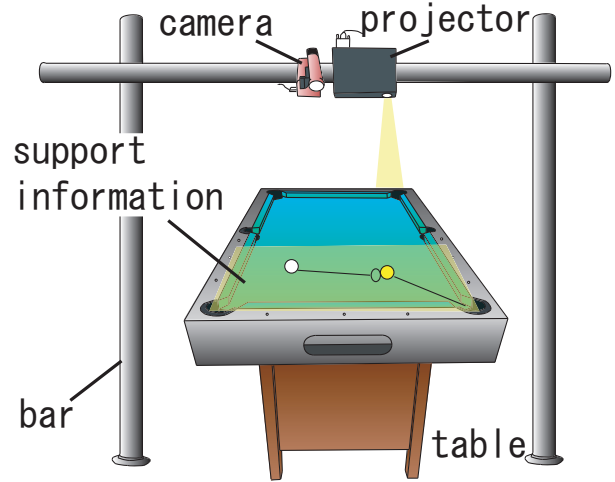


図 1: カメラ・プロジェクタ作業支援システムの概観

的に作業手順を提示する。

本研究では、カメラとプロジェクタを利用して本来の作業を阻害することなく作業支援を行うことができるシステムの開発を目指した。具体的な作業としては、ビリヤードにおける球を穴に入れる作業を扱う。球を穴に入れるという作業の目標を達成するためには、作業手順を作業空間上で正確に提示する必要があり、HMDを利用するより<sup>[1]</sup>、プロジェクタによる作業空間への重畳表示が特に有効と考えられる。実際にはカメラ画像から得た球の配置から作業段階を認識し、手順決定支援情報として4種類のショットの理想的な打ち筋の情報、手順遂行支援としてキュースティックの向きと位置の情報、打つ強さの情報をプロジェクタにより直接提示する。さらに、本システムを利用してショット遂行実験を行い、その有用性を確認した。

## 2. 作業支援システム

本節では提案するカメラとプロジェクタを用いた作業支援システムの概要を述べる。2.1節ではカメラ・プロジェクタ作業支援システムの構成を示し、2.2節ではシステムによる正確な支援提示に必要な平面座標間の位置合わせの手法について述べる。

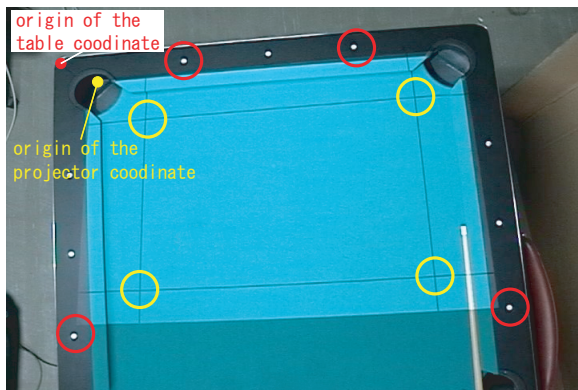


図 2: 座標平面の位置合わせに用いた点

## 2.1 カメラ・プロジェクタ作業支援システムの概要

カメラ・プロジェクタ作業支援システムの概観を図 1 に示す。ビリヤード台の上方に作業段階認識用のカメラ一台と作業支援情報提示用のプロジェクター台を取り付けている。カメラは Panasonic 製のデジタルビデオカメラ NV-GS5 を使用し IEEE1394 ケーブルで計算機と接続している。カメラ画像のサイズは幅 720 pixel, 高さ 480 pixel であり, 画像は 20 fps で更新獲得できる。現在のところ, プロジェクタの投影範囲がビリヤード台の 1/3 程度であるため作業支援範囲も同程度に限られている。

## 2.2 平面座標の位置合わせ

本システムにはビリヤード台座標平面  $P_t$ , カメラ画像座標平面  $P_c$ , プロジェクタ座標平面  $P_p$  の 3 つの平面が存在する。正確な作業段階の認識と作業支援情報の提示を行うためには, この 3 つの座標平面の位置合わせをする必要がある。平面の位置合わせは, 平面間の射影変換行列を求めればよく, そのためには平面間で対応の取れた 4 点が必要となる。平面間の関係は射影変換行列  $H$  を用いて表すことができる<sup>[2]</sup>。

座標の位置合わせをする際に用いた点を図 2 に示す。各平面間の対応付けには, まずビリヤード台の 4 つの罫 (赤い丸) を用いて, 平面  $P_c$  と平面  $P_t$  間の射影変換行列  $H_{ct}$  を求める。次に, プロジェクタによって投影した直線の交点 (黄色い丸) を用いて, 平面  $P_p$  と平面  $P_c$  間の射影変換行列

$H_{pc}$  を求める。すると, 平面  $P_p$  と平面  $P_t$  間の射影変換行列  $H_{pt}$  は

$$H_{pt} = H_{pc}H_{ct} \quad (1)$$

とすることで求めることができ, これによって各座標平面間の対応付けができる。

## 3. 作業段階の認識

作業段階の認識は, カメラ画像に対してコンピュータビジョン技術を用い, 球の配置を把握することにより実現する。そのためには球の位置の測定と球番号の判定が必要なる。本節では, その手法と球配置の認識結果を示す。

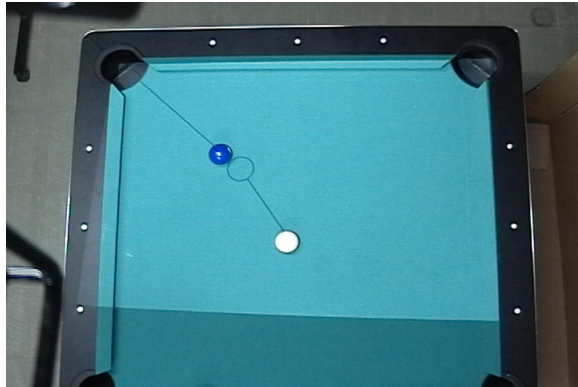
### 3.1 球位置の測定と球番号の判定

球位置は円のハフ変換によって測定する。まず, 入力されたカメラ画像に対してエッジ検出および 2 値化を施しエッジ画像を得る。次に, そのエッジ画像に対して円のハフ変換を行うことによって球の位置を測定する。ハフ空間に投票する際に用いた変換式は

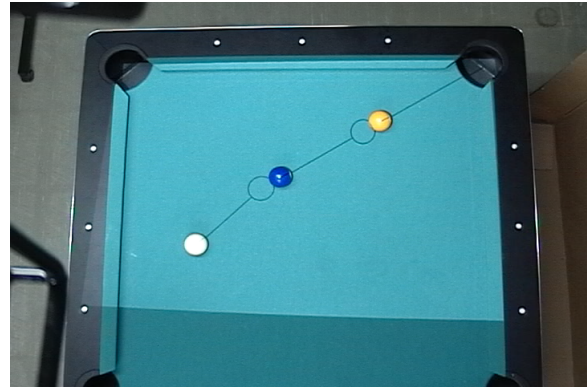
$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r \quad (2)$$

である。ここで  $a, b$  はエッジ画像上の座標,  $x, y$  はハフ空間上の座標で  $r$  は円の半径である。この  $r$  はエッジ画像上の検出したい円の半径である。一般に, 円のハフ変換には計算時間がかかる。しかし, 本システムではカメラとビリヤード台の位置は固定という制約により,  $r$  をほぼ一定にすることができ, ハフ変換による円検出をより高速に行っている。

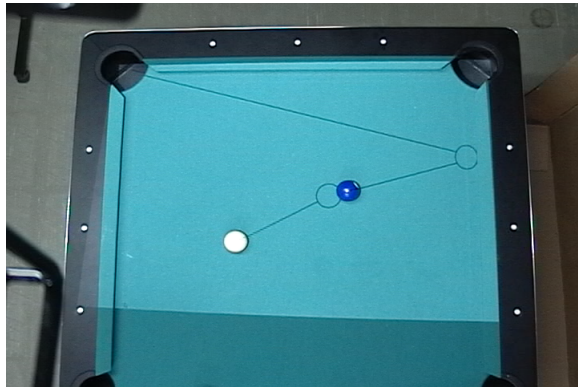
球が検出されると, 次は球番号を判定する必要がある。球番号と球の色は一対一に対応しているので, 本研究では球の色を認識することで球番号を判定する。色認識は, 球ごとに円内部の画素の RGB 空間における色の分布を確率密度関数によって近似し, 認識対象の画素値を入力すると, その該当確率を求める各球に固有の識別器を作成して行った。確率密度関数として正規混合分布を用い, EM アルゴリズム (Expectation Maximization Algorithm)<sup>[3]</sup> によってそのパラメータを推定した。色認識の対象は検出された円の内部領域とした。



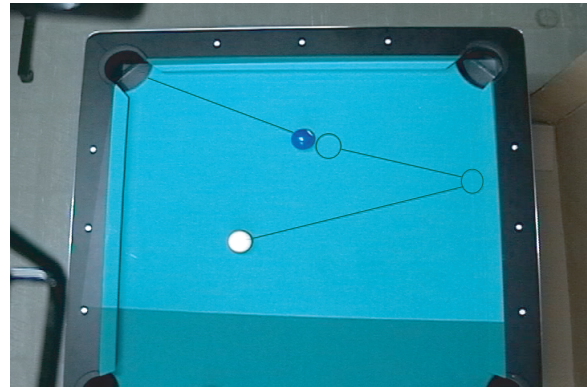
(a) ノーマルショット



(b) コンビネーションショット



(c) バンクショット



(d) クッションを使ったショット

図 4: ショットの理想的な打ち筋の提示

### 3.2 球配置の認識結果

球配置の認識結果を図3に示す。矩形で囲まれている部分が円として検出された部分で、矩形の色は色認識の結果を表している。手の部分にある黒い矩形は誤検出された円であり、色認識によってどの球とも対応が取れないと判断され削除されている。

## 4. 作業支援情報

未習熟者が作業を効率的に行うための作業支援情報として、次の手順を決定するための手順決定支援情報と、手順を遂行するため手順遂行支援情報がある。まず、4.1節で作業決定支援情報の提示について述べ、次に、4.2節で作業遂行

支援情報の提示について述べる。

### 4.1 手順決定支援情報の提示

次の手順を決定する際、球の配置により様々な手順が考えられる。そこで、本システムでは4つのショットの理想的な打ち筋(図4)を順に提示し、作業者がその中から練習したいショットを選択するようした。ここでいう「理想的」とは、その提示どおりに打てたとすると球をポケットに落とすことができるという意味で、この理想的な打ち筋は、球の配置とポケットの位置情報を元に幾何的に求めている。

クッションに球があたったときの跳ね返りは、球の速さと大きな関わりがある。本システムでは、まだ厳密な物理的な計算を行っていないの

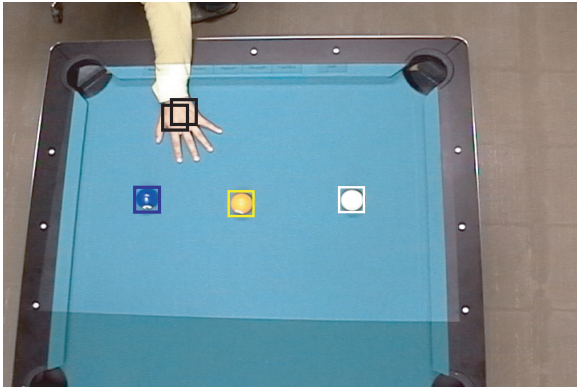


図 3: 球の配置の認識結果

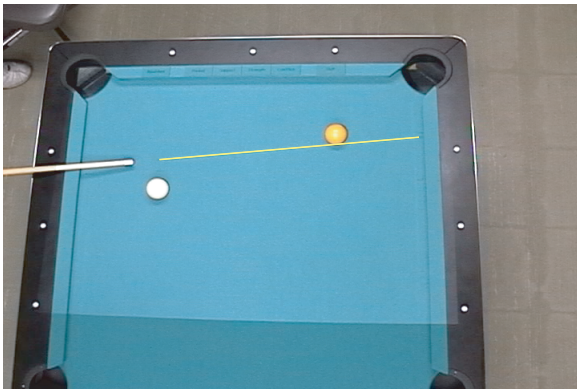


図 5: キュースティックの向きと位置の提示

で、球の速さに対する跳ね返りを計算することができない。そのため、提示どおりに打てたとしても打つ強さによってバンクショットやクッションを使ったショットでは失敗することがある。

#### 4.2 手順遂行支援情報の提示

技術不足の未習熟者にとって、作業を遂行するために必要な技術的な情報としてキュースティックの向きと位置の情報、および打つ強さの情報が重要である。以下では、その提示手法について述べる。

##### 4.2.1 キュースティックの向きと位置の提示

キュースティックは作業者が手に持って扱う道具でなので、その状態の情報は重要である。よって、キュースティックをトラッキングし作業者に対し逐次その向きと位置の情報を提示する。

キュースティックは直線のハフ変換によりカメ

ラ画像から検出している。ショットを決定すると、ある程度打つ向きを限定できるので、探索範囲を絞ることでキュースティックのトラッキングを可能としている。また、キュースティックを検出する際、ビリヤード台に含まれる直線形状がキュースティック検出の妨げとなるので、入力として得られた画像のエッジ画像と、あらかじめ用意しておいたビリヤード台のエッジ画像の論理演算を行うことで高速に不要なエッジを消去している。

キュースティックの向きと位置の提示結果を図5に示す。キュースティックの状態は黄色の直線で提示され、その直線の傾きがキュースティックの向きを表し、直線の白球側の端点がキュースティックの打球位置を表している。

##### 4.2.2 突く強さの提示

突く強さはクッションを使ったショットや手球のコントロールを行う際、重要な情報である。そこで、手球と的球の間に円が表示され、その移動速度によって打つ強さを提示している。移動する円を追いかける速さで打つと適切な強さで打つことができる。突く強さは、「強い」、「普通」、「弱い」の3段階あり球を落とすために必要な距離によって強さを決定している。ただしクッションを使ったショットでは手球(白球)からクッションまでの距離で強さを決定している。これは、球の速さによってクッションの跳ね返りが変わるので、適切な速さでクッションに球が当たるようにするためである。

## 5. 評価実験

まず、5.1節で物体の提示される情報の精度を評価する。次に、5.2節で本システムの有用性をショット遂行実験により評価する。

### 5.1 物体の提示支援情報の精度評価

提示される支援情報の精度を評価するために、まずは平面座標の位置合わせの精度を測定する。次に球位置の検出精度を測定し、最後にキュースティックの提示精度をする。

#### 5.1.1 平面座標の位置合わせ

平面座標の位置合わせ精度評価は、ビリヤード台上にカメラキャリブレーション用のチェスボードを置き、チェスボードの格子点のカメラ座標をマウスクリックにより得る。得えられたカメラ座

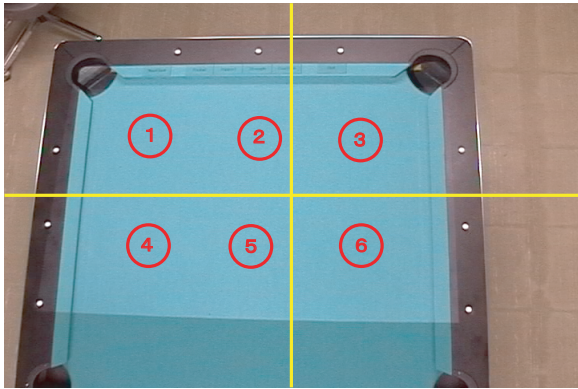


図 6: 計測位置

表 1: 平面座標の位置合わせの精度評価実験の結果

位置	1	2	3
平均 (mm)	1.89	5.14	4.02
位置	4	5	6
平均 (mm)	3.80	4.33	5.04

標ををプロジェクタ平面座標に変換し提示する。そのときの実際の格子点と提示された点との距離を測定した。測定箇所は図6の6箇所を10回測定した。

測定結果の平均値を表1に示す。この結果にはマウスクリックによる誤差と、平面座標の位置合わせの誤差が含まれている。マウスクリックによる誤差はどの測定箇所も同程度に含むと考えられるので、表1から、ずれの大きさは測定箇所により異なり、カメラのレンズ中心に近いほどずれが大きいくといえる。この非線形なずれは、カメラのレンズ中心に近づくほどずれが大きいくことからレンズのひずみから生じるものと推測される。今回実験で用いたショットについては、提示通り打つことでショットを成功させることができるので、提示できるショットにおいてはこの程度の位置合わせ精度で十分であると考えているが、より複雑なショットを支援するためには、精度向上を図る必要がある。

表 2: 球位置の測定結果

位置	1	2	3
平均 (mm)	1.05	3.01	2.99
分散 (mm <sup>2</sup> )	0.11	0.89	0.14
位置	4	5	6
平均 (mm)	3.95	5.49	5.03
分散 (mm <sup>2</sup> )	0.13	0.42	0.09



(a) カメラの視点

(b) 作業者の視点

図 7: 視点の違いによる提示の不一致

### 5.1.2 球位置の測定精度

ここでは、検出された球の中心点を提示し、実際の球の中心点との距離のずれを測定する。台上の6つ(図6)の部分で10回づつ測定を行い、それぞれの平均値と分散を求めた。測定結果を表2に示す。表2と表1の平均値を見ると同様の傾向があり、レンズひずみの影響が見受けられる。

球位置の測定精度はハフ変換による円検出の誤差と、平面座標の位置合わせの誤差の影響を受けるが、以下では円検出の精度について考察する。カメラからは球は楕円に見えるが、本手法では円に近似して球を検出しているため球の中心がぶれて検出されることが予測される。実際に、画像中の球の長軸と短軸の長さを画素数で測って比を取ったところ1.06であるので円とみて問題ない。球位置の測定誤差についても、今回の実験では大きな問題にはなっていないが、さらに改良する必要があるが、実時間処理との兼ね合いが大きな問題である。

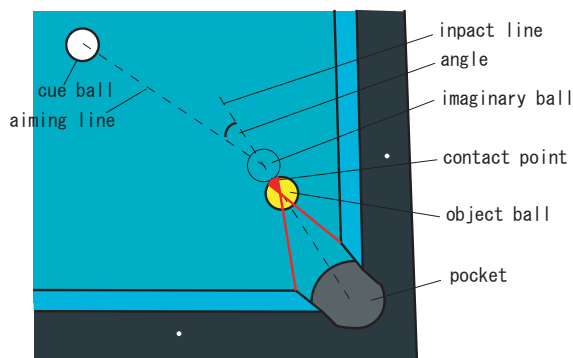


図 8: ショットの難易度

### 5.1.3 キュースティックの提示精度評

実際のキュースティックと提示された直線との角度の差を測定したところ、差はわずかであり、今回実装したショットを成功させるには問題にならない程度だった。しかし、台に対してキュースティックが水平ではない場合、カメラがキュースティックを真上から見ていないので、キュースティックの向きを正しく検出できない。そのため、作業者は提示通り正しく狙っているがキュースティックの向きの提示が作業者の感覚と違うため、作業者を混乱させてしまうことがあった。

## 5.2 作業支援システムの評価

支援情報の提示効果によって作業の遂行率が伸びたかどうかを実験により評価し、本システムの有効性を示す。本システムは未習熟者を対象としたシステムなので、正確な実験結果を得るためには、作業にさほど習熟しておらず、かつ同じ習熟度である人を対象に行う必要がある。本節では、5.2.1 で作業者の習熟度の判断基準を述べ、5.2.2 で支援システムの評価について述べる。

### 5.2.1 習熟度の判断

作業段階の難易度にあたる、「狙った球の落としにくさ」は、手球を当てればポケットに的球を落とすことができる点(面)である狙い点(図 8:contact point)の大きさと、手球からの狙い点の見え方によって決まる。狙い点の大きさは的球-ポケット間の距離によって決まり、狙い点の見え方は、狙い線(図 8:aiming line)と、的球とポケットを結ぶ線(図 8:inract line)が作る角度(図 8:angle)によって決まる。したがって、的球-

ポケット間の距離と角度を基に作業段階の難易度を判断することができる。具体的には、距離が大きく、角度が 90 度に近いショットが難しいショットである。

作業者の習熟度の判断は、実験を行う前に 10 回打ってもらい、作業段階の難易度に対するショットの成功率を基に判断した。

### 5.2.2 支援情報の提示効果

実験では、支援情報提示なしを 5 人、支援情報提示ありを 5 人に 10 回ずつ打ってもらい作業遂行率を求めた。実験を行う前に各作業者に 10 回ずつ打ってもらい、作業の難易度に対するショットの成功率を基に習熟度を判定し、二つのグループの間で習熟度に差が出ないように調整した。ノーマルショットとクッションを使ったショットを用いて実験を行った。

実験結果を図 9 に示す。図より支援情報を提示をすると手順遂行率が伸びることがわかる。クッションを使ったショットについては、成功率だけでなくヒットも記録した。ヒット率のグラフの破線は、成功した場合を除いたときのグラフの高さを示している。支援情報を提示するとヒット率が上昇し、それがそのまま成功率の上昇につながっているのが分かる。以上の結果と考察により本システムで用いた提示情報と提示法は有効である。

## 6. おわりに

本稿では、ビリヤードのショット練習を対象としたプロジェクタ・カメラシステムによる作業支援システムを提案した。またシステムを構築し、その有用性を実験により確認した。今後の課題と展開として以下のことがあげられる。

- キュースティックの位置姿勢計測の精度向上: カメラ 1 台によってキュースティックの位置姿勢の計測を行っているの、あいまい性が残ってしまい、計測精度が低くなってしまう。そこで、例えばカメラを複数設置し、キュースティックの位置姿勢を計測することで精度を上げることができると考えられる。
- 作業支援範囲の拡大: 作業支援範囲を台全体へ拡大し、実際のゲー



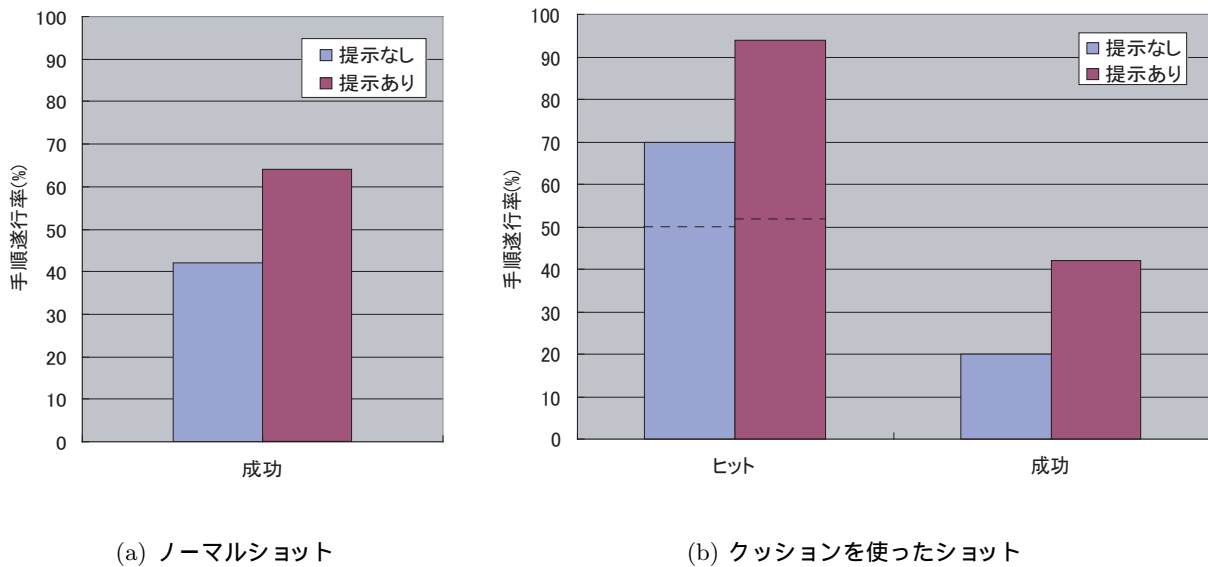


図 9: 作業遂行率の比較

ムなどのより複雑で高度な作業についても支援できるようにする。

- 作業者の癖や苦手を分析し、作業者に適した支援情報の自動生成：  
システムが作業者の癖や苦手といった個人的な特徴をつかみ、作業者に最も適切な提示情報を生成し支援情報を提示できるようにする。これにより高い支援効果を期待できる。
- 本システムを用いた練習の有用性の評価：  
本システムを用いることで習熟の速度が高まるかどうか実験し評価する。

[3] Lei Xu and Michael I. Jordan, On Convergence properties of the EM Algorithm for Gaussian Mixtures, *Neural Computation*, vol.8, pp.129–151, 1996.

#### 参考文献

- [1] Tony Jebara, Cyrus Eyster, Josh Weaver, Thad Starner and Alex Pentland, Stochastics: Augmenting the Billiards Experience with Probabilistic Vision and Wearable Computers, *Proc. of the Intl. Symposium on Wearable Computers*, pp.138–145, 1997.
- [2] 徐剛, 辻三郎, 3次元ビジョン, 共立出版 1998.