

## 応用論文

## バレーボールにおけるブロックマシンの開発と運用

佐藤 綱祐<sup>\*1</sup> 植田 真弘<sup>\*2</sup> 渡辺 啓太<sup>\*3</sup>  
水野 秀一<sup>\*4</sup> 眞鍋 政義<sup>\*4</sup> 矢野 博明<sup>\*1</sup> 岩田 洋夫<sup>\*1</sup>

## Development and Investment of a Block Machine for Volleyball Attack Training

Kosuke Sato<sup>\*1</sup> Masahiro Ueda<sup>\*2</sup> Keita Watanabe<sup>\*3</sup>  
Shuichi Mizuno<sup>\*4</sup> Masayoshi Manabe<sup>\*4</sup> Hiroaki Yano<sup>\*1</sup> and Hiroo Iwata<sup>\*1</sup>

**Abstract** – This paper presents a system that consists of three robots to imitate the motion of top volleyball blockers. In a volleyball match, in order to score by spiking, it is essential to improve the hitting percentage of each spiker. To increase the hitting percentage, iterative spiking training with actual blockers is required. Therefore, in this study, a block machine system was developed that can be continuously used in an actual practice field to improve attack practice. This robot performs high speed movement on 9 m rails that are arranged in parallel with the volleyball net. In addition, an application with a graphical user interface to enable a coach to manipulate these robots was developed. It enables the coach to control block motions and change the parameters such as the robots' positions and operation timing. Through practical use in the practice field, the effectiveness of this system was confirmed. In this paper, we describe the effectiveness to players through utilization of the system in actual practice. In addition, we clarify the improvement points exposed at that time, propose and construct a sensor system and describe its evaluation and future possibilities.

**Keywords** : Human-Robot Interaction, Sports Training, Robotics, System Design

## 1 はじめに

近年のスポーツ分野における運動技能の向上や試合に勝利するための手段として、トレーニング手法・メニューの改善や新しい用具の開発・既存用具の改良、戦略分析・戦略立案など多岐にわたるアプローチに関して、工学の分野を応用してより効果的に解決しようとする動きが盛んである。

筆者らは公益財団法人日本バレーボール協会より委託を受け、バレーボール全日本女子チームがリオデジャネイロオリンピック(2016年ブラジル開催)において金メダルを獲得するための新しいトレーニング用具開発の要望が上がった。そこで本研究ではバレーボールに着目し、運動技能向上のための新しいトレーニングシステムを提案する。バレーボールの試合において、勝利するための最も大きな要因であるアタック決定率向上のためには、被ブロック率を抑制し、攻撃力を上げることが必要不可欠である。また被ブロックによる失点は、セットの勝敗を大きく分ける要因であることも知られているため [1], 被ブロック率を抑制し相手が勢いづくことを抑止することで、守備力を向



図1 ブロックマシンシステム  
Fig.1 Block Machine System

上することにもつながる。そのためブロックの高さを十分に有し、アタックのコースを複数人で限定させる戦略的・組織的でより実践に近いブロック形態を提示し、アタック練習の内容を充実させるトレーニング用具が必要とされている。そこで本研究では上記を満たし、人間のブロッカー、特に世界のトッププレイヤーのブロック動作を模擬するロボットを提案する。

これまでもスポーツのトレーニング支援のための様々なシステムが開発されてきた。しかし、トッパスリートのプレーや動作を模擬し、実際の練習現場で活用されているロボットはほとんど見受けられない。

\*1筑波大学 — University of Tsukuba

\*2美津濃株式会社 — Mizuno Corporation

\*3日本バレーボール協会 — Japan Volleyball Association

\*4ヴィクトリーナ姫路 — Victorina Himeji

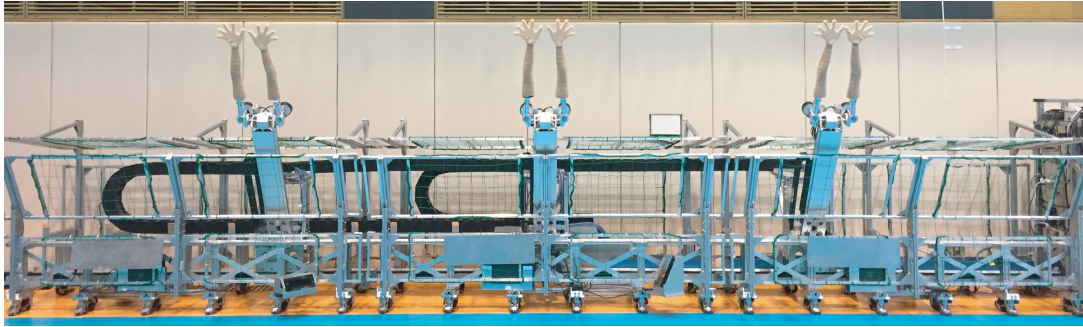


図2 システム全体の外観  
Fig. 2 The overall appearance of the whole system

なぜならトップアスリートのプレーや動作を模擬するためには、動作スピードや機構強度が高いレベルで要求され、かつそれらは可用性が高いものでなければならない。そこで本研究ではこれまでブロック動作の本質的再現を目的とし、ロボットに必要な自由度を限定することで、動作スピードをトップアスリートと同等な性能を持ちつつも、十分な強度を有するロボットの設計・開発を行ってきた [2]。トップアスリートと同等な性能を有することは、動作スピードや制御手法の工夫により全てのスキルレベルのプレイヤーに対して、最適なトレーニング支援を行えることにも繋がる。

本論文では、ロボット3体から構成されるシステム(図1)を容易に、かつ柔軟に操作可能なアプリケーションの詳細について述べる。また実際の練習におけるシステムの活用を通じた選手への効果・有効性について、さらにその際に出した改善点を整理し、改善するためのリアルタイムボール位置認識システムを提案・構築し、その評価と今後の可能性について述べる。

## 2 関連研究

### 2.1 スポーツ工学研究

バレーボールをはじめとする球技スポーツでは、試合中の変化する多様な状況を瞬時に認識、判断し、最適なプレーを選択、実行することが要求される。プレー状況を合目的的に解決するために行う、個々の選手の具体的・実践的な行為は個人戦略と呼ばれ、その達成力は (a) 技術力 (技術的要素) と (b) 戦術的思考力 (知覚・認識的要素) に規定される [3]。例えばバレーボールの攻撃シーンにおいて、攻撃の精度や打点の高さ、ボールのスピード、動作の習熟度が (a) の技術力に相当し、セッターから上がったトスに対して、相手ブロッカー3枚のブロック形態やレシーバーの位置・姿勢からどのコースを狙うか、あるいは状況によってブロックアウト (ブロッカーの腕の端や指先を故意に狙って攻撃を打ち、ボールをコートの外に弾き出して得点を獲得するテクニック) を狙うか、と

いった状況判断が (b) の戦術的思考力に相当する。

(a) の技術力は反復練習を行うことで選手は個人トレーニングとして1人あるいは数人だけのシチュエーションにおいても習得することが可能である。一般的に市販され普及しているトレーニング用具としては、野球のピッチングマシンや卓球、バレーボールのサーブマシンなどが挙げられる。これらの基本的な仕組みは対向する2つの高速回転するローラでボールを挟み込みながら摩擦力を利用して放出している。実際人間が放出したボールに似た軌道となるよう作り込まれているため、レベルの高い選手が放出する高速なボールや変化球などを断続的に提示することが可能となり、反復練習に最適である。また研究段階のものとしてはバドミントンのシャトルを放出するマシン [4] などが挙げられる。

一方、(b) の戦術的思考力は常に練習相手の存在が必須であり、そのような練習機会は限定されていることが多く、また同一シーンの再現性が低いと言える。戦術的思考力を鍛えるトレーニング用具は重要度が高く、実際の現場で必要とされているにもかかわらず、練習フィールドに普及しているものは少ない。しかし近年その重要度が注目されはじめ、またスポーツ工学分野の発展も伴い、研究段階で多く見受けられるようになった。例として、上村らによって開発されたカーリングロボットは、カーリングのストーンを投球する投球ロボットと戦略シミュレータから構成され、人間と対戦可能なシステムを提案している [5]。しかしロボットの固定場所が限定的であり、また1投ごとに多くの時間を必要とするなどの問題点が多く、実際の現場で使用できる段階ではない。また Stoev らによって開発された Badminton playing robot は、リアルタイムにバドミントンのシャトルの位置を認識して軌道を予測し、プレイヤーに打ち返すシステムを提案しているが [6]、プロトタイプの段階で自由度が限定されており、実用段階であるとは言えない。

またCGの技術を活用して、HMDやディスプレイ

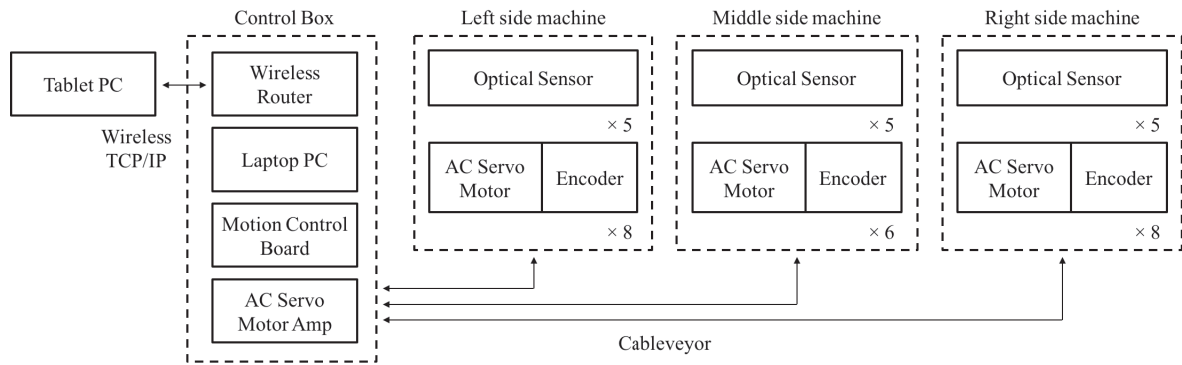


図3 システム全体のハードウェア構成  
Fig. 3 Hardware Configuration of the whole system

に実際の試合のシーンやシチュエーションを想定して提示するトレーニングシステムも近年、多数報告されている [7]-[11]。これらの手法は実際の試合の再現性が高い一方で、ボールや相手選手との物理的なインタラクションがほとんどない。特にバレーボールにおいて、ワンタッチ (後述) やブロック後のボールの挙動の再現は必要不可欠であり、映像提示だけでは不十分であるといえる。

## 2.2 バレーボール研究

バレーボール研究に着目すると、アタック時の3次元動作解析や筋電計測などのバイオメカニクスの側面からのアプローチ [12] や、戦術的研究 [13]、プレー中の注視点に関する研究 [14]、データ解析のための画像処理に関する研究 [15] など多岐にわたって研究が行われている。しかしこれらの研究は理論的な解決策を見出す術でしかなく、実際の練習現場において活用されている身体動作を伴うトレーニング用具はほとんどないのが現状である。先述した技術力を向上するサブマシンはレシーブ力を鍛える用具であるが、アタックに関する技術力および戦術的思考力を向上させる用具はないために近年は特に熱望されている。

筆者らはこれまで、アタックに関する技術力および戦術的思考力を鍛えるトレーニングシステムとして、ブロックマシンシステムを開発してきた [2]。これまでの研究において、マシンの性能評価を行いトップアスリートと同等の性能を有し、動作を模擬することが可能であることを明らかにした。しかし実際の練習現場においてシステムを継続使用した時の選手への効果に関する研究はまだ行われていない。そこで本論文では、選手への効果・有効性を検証し、スポーツトレーニングにおいてロボットを活用することの価値に関して議論する。以降3章ではブロックマシンのシステム構成について簡単に述べ、4章で選手への効果、5章ではシステム運用を通じて表出した問題点を整理し、その改善案と今後の可能性について述べる。

## 3 システム概要

### 3.1 ブロック形態の種別

ここでバレーボールのブロック形態について整理しておく。攻撃側の視点から大きく3つに分けることができ、センター攻撃、サイド攻撃、バックアタック攻撃の3種類である。センター攻撃はA,B,Cクイックなどいくつか種類は存在するが、基本的にはセッターから短いトスが上げられ、ミドルの選手がアタックを行う。通常ブロックは1人あるいは1.5人が動作を行う。ここでいう0.5人とは、アタックに間に合わずに不完全な状態 (ネットから少し手が出ているブロックや極端に腕が斜めのブロック) のことを指す。サイド攻撃はセッターからの山なりトスや平行トスがレフトないしはライト方向へ上げられ、サイドの選手がアタックを行う。通常ブロックは1.5人あるいは2人が動作を行う。バックアタック攻撃はセッターから山なりのトスがエンドライン側へ上げられ、後衛の選手がアタックを行う。通常ブロックは2人あるいは3人が動作を行う。

### 3.2 ブロックマシンシステム

ブロックマシンシステムは全長9,000mmのレール上を、ブロッカーを再現したマシン3体が移動し (図2)、ジャンプや腕の動作を行う。各マシンの自由度は、ブロック動作の本質的再現のための必要最小限構成とし、左右走行動作 (図4(d))、ジャンプ動作 (図4(b))、前傾動作 (図4(c))、各腕内外転動作 (図4(c)) の5自由度を有する。各機構を駆動するモータはACサーボモータを採用し、各軸制御のためのモータアンプやコントローラ、PCはレール横脇の制御盤内に全て格納し、各マシンへの配線はケーブルベアを通じて供給される (図3)。マシン単体の横幅は約400mmであり、これは人間の肩幅と同等程度のため、実際のブロックと同様にブロッカーが隣り合うブロック形態を提示することが可能である。またマシン単体の縦幅は約1,000mm、

表1 各機構におけるモータ, 減速比  
Table 1 Motors and reduction ratio in each mechanism

	機構	モータ	減速比
横移動 (中央)	ラック&ピニオン, ピッチ円 $\phi 40\text{mm}$	SV-M500AK(5kW) $\times 2$	なし
横移動 (サイド)	ラック&ピニオン, ピッチ円 $\phi 60\text{mm}$	MSME041G31N(400W) $\times 4$	1/4
ジャンプ動作 (共通)	タイミングベルト・プーリー, 直径 $\phi 100\text{mm}$	MSME041G31N(400W)	1/4
前傾動作 (共通)	ウォームギア・ウォームホイール	MSME041G1U(400W)	1/40
各腕動作 (共通)	ウォームギア・ウォームホイール	MSME041G1U(400W)	1/40

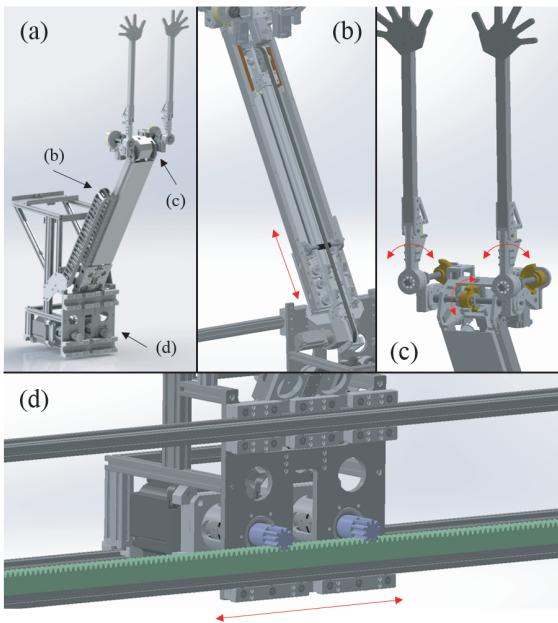


図4 マシン単体の外観と各機構  
Fig.4 Appearance of a machine and each mechanism

システム全体では約 1,500mm であるため, コート内アタックライン内に収まる. そのためレシーブの選手が配置につくことも可能であり, プレーを阻害することはない. 基本的な骨格部分は断面 30mm 四方のアルミフレームで構成され, 質量はモータ等の含めてマシン単体で約 80kg である. またマシンの手指に関しては, 手首や指のしなりを再現しつつ, アタックされた高速なボールに耐えうる十分な強度を持たせるため, 3mm 厚のポリカーボネートを 4 枚重ね, 人の手指形状に合わせて形成するとともに, 視認性を人の手指と同等にするため肌色の手袋を被せた. また各機構の絶対位置・角度取得のため, 起動時に光学センサを用いてキャリブレーションを行う.

### 3.3 マシン動作要求仕様

センター攻撃やバックアタック攻撃に関しては, ネット中央付近でのアタックが一般的であり, セッターによるトスリリースからアタックまでの時間は平均約 500ms である. 一方サイド攻撃に関してはネット両端でのアタックとなり, トスリリースからアタックまでの時間は最も速いシーンで約 1,100ms である. そ

こで各マシンの動作仕様は以下の通りとなる. 左右走行動作において, 中央のマシンはレール端への最大可動域 3,700mm の移動, サイドのマシンは最大可動域 2,000mm の移動をそれぞれ 1,100ms で行える必要がある. またジャンプ動作, 前傾動作, 各腕内外転動作において, 素早い攻撃であるセンター攻撃に対応するため, 500ms で初期位置・姿勢からブロック形態を提示できる必要がある. これらの条件を満たすことにより, トップアスリートのアタック攻撃に対応することが可能であるといえるため, 各動作に対して上記の条件を満たす機構, モータ, 減速機を用いる (表 1) 左右走行動作における制御に関しては, 複数モータによる同一軸制御のため, モーションコントロールボードの協調制御の機能を用いてモータの制御を行う.

なお各マシンの初期位置・姿勢は図 2 の通り, 中央のマシンはレール中央, 両サイドのマシンは中央から約 2,000mm の位置とする. これはバレーボールの試合において, 用いられることの多い一般的なバンチブロックのポジショニングである. またジャンプ機構は最下点, 前傾機構は前傾 30deg, 両腕内外転機構は 0deg とする. また各動作の可動域に関しては, 左右走行動作は 9,000mm のレール上を各マシンが干渉しない範囲 (約 7,800mm), ジャンプ動作はブロック時における一般的なジャンプ高 (約 500mm) を考慮した高さ (600mm), 前傾動作は直立 0deg から前傾 30deg, 左右内外転は左右方向それぞれ 30deg とする.

### 3.4 ブロックマシンシステム制御手法

本システムの目的は練習における運動技能向上のためのトレーニングシステムの確立である. そのため, 指導者やコーチの練習意図をマシンに反映させる必要がある. しかし, マシン 1 体あたり 5 自由度を有し, システム全体として計 15 自由度のシステムを手動で操作することは不可能である. そこで手動操作でも, 指導者やコーチの練習意図を反映させつつ, 柔軟にマシンを操作できるよう, タブレット PC を用いてシステムを制御する手法を採用した.

### 3.5 操作用 GUI アプリケーション

3.1 で述べた攻撃パターンに対応し, またブロック形態を柔軟に提示可能とするための操作用アプリケーションとして, タブレット PC で操作可能な GUI ア

アプリケーションを開発した。指導者やコーチが容易に操作可能とするために直感的なインターフェースとし、各マシンの位置や動作タイミング、ジャンプ高さ、腕の角度を任意に設定可能とした。

本アプリケーションの主な機能として、大きく2つに分けることができる。

- (1) 左右のサイド攻撃に対応するアンテナ際のブロック動作の操作
- (2) センター攻撃、バックアタック攻撃に対応するネット中央付近のブロック動作の操作

各機能の特徴を以下に述べる。サイド攻撃に関しては、詳細なブロック形態の指定が練習中において求められる。なぜなら、アンテナ際でのアタックがそのほとんどを占めるため、アタッカーは通常、ブロッカーとアンテナの間やブロッカー同士の間、あるいはブロッカーの腕に当てて外に出す得点（以下、ワンタッチアウト）を狙うためである。そのため(1)においては、アンテナ-マシン間距離、マシン-マシン間距離、各腕の角度、ブロックの完成タイミング、ジャンプの高さのパラメータを詳細に変更できる必要がある。そこであらかじめこれらのパラメータを登録し、各方向計10パターンのブロック形態を保存する(図5)。練習中においては目的となるブロック形態をこの中から選択する。選択後も上記パラメータの変更が可能であり(図6)、保存あるいは破棄することも可能である。

図6において、イラストの頭部を横方向にドラッグすることで各マシンの最終ブロック位置を、縦方向にドラッグすることで各マシンのジャンプ高さ(0~600mm)を変更できる。最終ブロック位置はアンテナ-マシン間距離で0~1.5m(10パターンのうち2パターンは汎用性向上のために3.0mまで可能)の範囲で変更できる。また各腕を左右にドラッグすることで各腕の角度(-30~30deg)を変更できる。GUIプログラム上で各マシンや各腕が干渉・接触しないように最終ブロック位置を計算することで、指導者やコーチによるマシンの操作においても安全にシステムの運用が行える。またブロックの完成タイミングに関しては、タブレット操作者が動作開始ボタンを押下してから指定されたブロック形態が完成するまでの時間を1.1~1.4秒の範囲において0.1秒刻みで選択可能である。

一方、センター攻撃やバックアタック攻撃に関しては、トスの位置に応じて様々な場所でアタックが行われる。そのため詳細なブロック形態と比較すると、アタック位置に応じたブロック位置の瞬間的な判断での正確性が必須となる。そこで(2)においては、セッターにより上げられるトスの位置に応じてブロック位置を指定するインターフェースとした(図7)。アタック位置

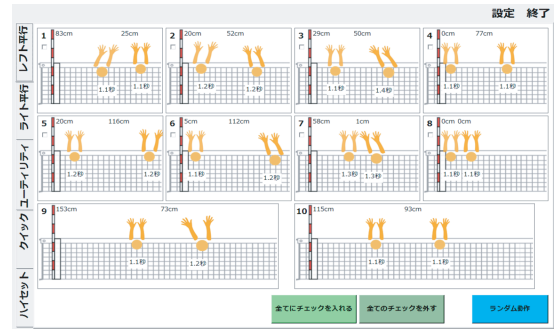


図5 GUI操作(1)  
Fig.5 GUI operations of type (1)

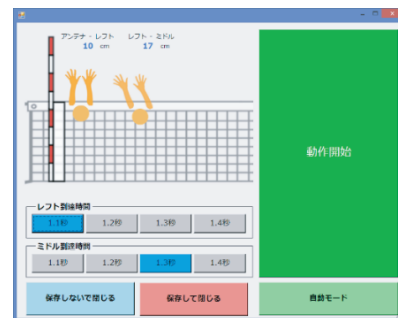


図6 詳細なブロック形態の指定  
Fig.6 Specification of detailed block form

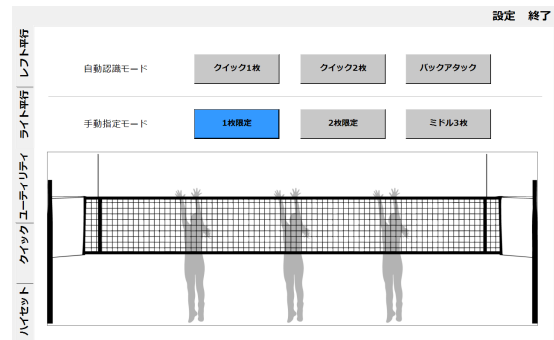


図7 GUI操作(2)  
Fig.7 GUI operations of type (2)

に応じてタブレット上でのネットに対する相対的な位置をタップすることで、その位置に応じたブロック動作を各マシンが自動で行う。センター攻撃のタイミングを考慮して、タブレットをタップしてから約500ms前後でブロック形態が完成する。なお事前に1,2,3人のブロック枚数を指定することで、タップ位置に応じて各マシンが自動で動作を行う(図8)。

#### 4 選手への効果検証実験

本システムは2016年7月に行われた、全日本女子バレーボールチームの練習合宿において、計8日間にわたって使用された。練習内においてタブレット操作

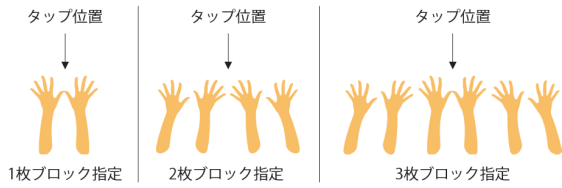


図8 ブロック人数指定に応じたブロック形態  
Fig. 8 Block form according to the number of block person

者であるコーチは、ブロック提示パターンやブロック位置などのパラメータを逐一変更し、アタッカーにマシンの動きを読まれないようにしていた。マシンを使用して練習を行う時は、コートのエンドライン後方および体育館2階キャットウォークからその様子を撮影し、映像として記録を残した。練習合宿中における映像データから、本システム使用時の選手の攻撃結果を解析し、継続的に使用した場合の選手への効果を検証する。

攻撃に関する技術力および戦略的思考力を鍛えるためのトレーニングとして、その効果を検証するためには攻撃決定率(=得点/総打数)の向上によって示すことができる。しかし本システムを使用した練習においては、実際の試合におけるレシーバーに相当する練習相手を配置していないため、試合時と本システム使用時の攻撃決定率を単純比較することはできない。そこで本稿では攻撃失点率(=失点/総打数)の指標によって評価を行う。つまり本システムの継続使用に伴って、選手の攻撃失点率が低下することが、攻撃に関する技術力および戦略的思考力が鍛えられていることを示しているといえる。

まず、本システム使用時の攻撃シーンにおける攻撃の結果を以下の5つに分類した。

- (a) イン：攻撃されたボールはマシンに当たらずにそのまま相手コート内に落下
- (b) ワンタッチイン：攻撃されたボールはマシンの手先や腕の端などに当たり、その後相手or味方コート内に落下
- (c) ワンタッチアウト：攻撃されたボールはマシンの手先や腕の端などに当たり、その後相手コート外に落下
- (d) ブロック：攻撃されたボールはマシンの手指や腕に当たり、その後味方コート内に落下
- (e) アウト：攻撃されたボールはマシンに当たらずにそのまま相手コート外に落下

上記結果の内訳を実際の試合に当てはめて得点・失点を想定すると、(c)は高い確率で得点、(d)および(e)は高い確率で失点、(a)および(b)は相手レシーバー次第で結果が異なる、あるいはプレーが続く、という結果となる。つまり今回においては、総打数に対する(d)と(e)の合計数の割合が攻撃失点率に近似できると考えられる。

#### 4.1 サイド攻撃における検証

バレーボールの試合において最も一般的で多用されるサイド攻撃に限定して、攻撃失点率の算出を行なった。練習合宿期間内で計4名の選手が本システムを用いてのサイド攻撃の練習に参加した。各選手における使用日毎の攻撃総打数を表2に、攻撃失点率の推移を図9に示す。この中でも、最も使用回数が多く継続して本システムを使用した選手Aに着目した。選手Aは8日間の練習合宿のうち、4日目と8日目は使用しなかったが計6日間の使用であった。なお、サイド攻撃におけるGUIアプリケーションは図5,6の機能を使用して操作が行われた。

#### 4.2 効果検証における考察

図9から、選手4名の本システムの継続使用による攻撃失点率低下の傾向が見てとれた。特に、最も使用回数が多く継続して本システムを使用した選手Aの攻撃失点率は、3日目以降攻撃失点率が単調減少した。2日目のみ、値が増加した原因としては、2日目の打数が少なかったことや使用初めでシステムに対して不慣れな状態であったことなどが考えられる。

また、選手Aの各日における結果の内訳の割合を図10に示す。図10より(a)インの割合が本システムの使用を重ねるとともに増加した。この結果より、使用回数を重ねるごとにマシンの動きを選手がしっかりと見て、空いているコースに打ち分けられるようになってきていたことがわかる。つまり攻撃に関する戦略的思考力を鍛えるためのトレーニングシステムとして有効であったことが示唆された。さらに合宿7日目(選手Aのマシン使用6日目)終了後に選手Aへのインタビューを行ったところ、「(自身の)攻撃に変化はない」との意見があった。つまり、意識的にマシンによるブロックを外して攻撃を打っていたのではないことを示している。

本システムの動作要求はトップアスリートを対象とし、実際の練習においてもその動作スピードやブロック形態の提示は世界トップクラスによるものを再現して反復練習を行っていた。一方で、バレーボールを専門とする高校生や大学生が本システムを使用して攻撃を行ったところ、代表選手と比較して攻撃失点率が非常に高い傾向にあることが予備実験によって示唆された。これは動作スピードやブロックの高さ

表2 システム使用日と打数  
Table 2 System usage date and attack count

使用日	1	2	3	4	5	6
選手 A	45	10	16	31	19	20
選手 B	8	18	32	0	0	0
選手 C	71	7	2	0	0	0
選手 D	11	9	0	0	0	0

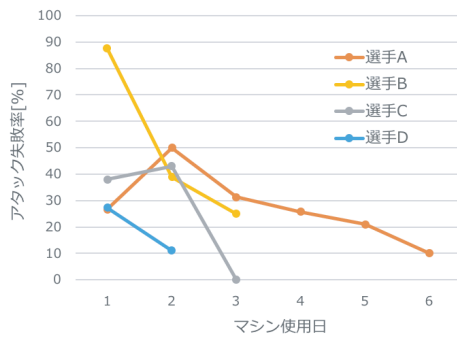


図9 アタック失点率の推移  
Fig. 9 Change in attack failure rate

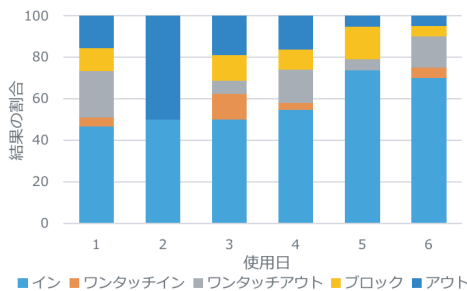


図10 アタック失点率の推移  
Fig. 10 Change in attack failure rate

などのアタック状況の難易度が、実際のレベルと適合していないために生じたと考えられる。選手個人にあわせた適切なレベル（実際のブロックと同等、あるいは多少難易度を上げたブロック形態）を GUI アプリケーション上で設定することで、ブロック位置や形態を見分けてアタックする練習となるといえる。

さらに本システムの実践における効果に関して考察する。上述したアタック失点率はマシンによるブロックに対する評価であり、実際の人間によるブロックに対するアタック失点率が変化しているかは未知である。そのため今後、本システム使用の前後における試合のデータ解析により同様の指標であるアタック失点率の変化を明らかにすることで、本システムの有効性を評価することに繋がると考えられる。一方で、本システムの実際の使用場面では、相手チームやライバルチームの典型的・特徴的なブロック形態を再現するために、

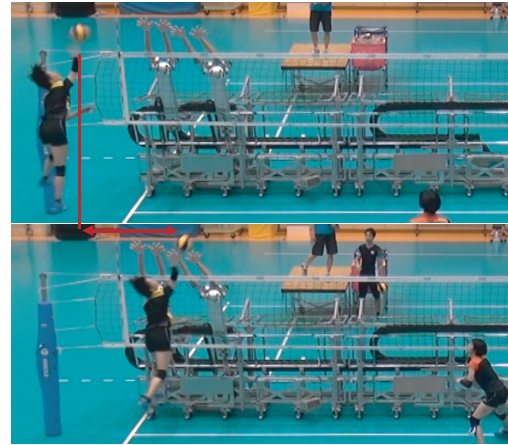


図11 短くなったトス  
Fig. 11 Shortened toss

図5,6の機能を使用してブロック形態を提示していた。つまりマシンの動作を最大限、実際の人間の動作に近づけるようにした結果のブロック形態であるため、本システムに対する効果は実際の試合においても同等の効果を見出せると考えられる。

今回の実験において一定の効果が示されたが、サイド攻撃時には詳細なブロック形態を指定できる一方、トスが上がった後にブロック位置を瞬時に変更することができない。そのため、図11に示すように、セッターからのトスが短くなった時にアタッカーの目の前にブロックを提示することができない。練習合宿中においても、このようなシチュエーションが何度か観測された。通常、サイド攻撃は図11上のようにネット端のアンテナいっぱいにとスが上げられるが、トス前のレシーブが乱れた時やセッターのミスなどにより、トスが短くなると図11下のように1~2m程度内側に寄ることとなる。そこでセッターから上がるトスの長さをセンシングし、自動でブロック位置を補正する機能を付加することにより、より効果的なトレーニングを提供できると考えられる。

そこで5章では、セッターから上がるトスの長さをリアルタイムで計測するシステムを提案する。

## 5 距離センサーを用いた自動モード

### 5.1 システム構成

本章ではリアルタイムにボールを認識する手法について述べる。スポーツシーンにおけるボール等の位置推定に関する研究はこれまで様々な手法で行われている [6][15]-[17]。主にコート後方からの俯瞰視映像を用いて、色情報によるボールの位置推定手法が提案されているが、本システムは練習現場における運用が想定されているため、以下の2点においてこれまでの手法を適用することは難しいといえる。1つ目は環境の整

備である。実際の練習現場では日毎、あるいは時間ごとに照明環境が異なり、また練習中のコート内には複数のボールが用いられるため、俯瞰視映像を用いた色情報によるボールの位置推定は困難であることが予備実験からも明らかとなった。2つ目はシステムの一体化である。練習システムとして容易に準備が可能で簡便に運用できる必要があるため、ブロックマシンシステムとセンサ系システムが一体型であることが望ましい。そこで本研究は、ブロックマシンシステム前面に設置する複数の深度画像センサを用いたボールの位置推定手法を提案する。

本システムは3台の距離画像センサ (Kinect v2) を用いて、ブロックマシンシステムレール下部に図12で示すように配置した。この位置と設置角はセッターの通常の定位置を考慮し、オクリュージョンを防ぐように、またアタックライン内の横幅9m、縦幅3mの範囲をカバーするように経験的試行によって決定した(図13)。Kinectは3台とも30度の仰角をつけ、ネット中央付近の上方が死角となるため、中央のKinectのみ縦置きで設置した。なお使用したKinect v2の解像度は $512 \times 424$ 、フレームレートは30fps、水平角度が70deg、垂直角度が60degで距離画像を取得できる。

## 5.2 ソフトウェア構成

### 5.2.1 ボール認識

距離画像に対してノイズ処理として動的背景差分法を用いた背景除去処理と膨脹収縮処理を行う。その後、前景として見なされた物体をラベリング処理により分類し、大きさ、縦横比、密度(画素数)の指標を用いて最もボールらしい物体を検出する。

### 5.2.2 座標変換

KinectはTime of Flight方式で物体との距離を算出しているため、5.2.1で求まるKinectからボールまでの距離は、Kinectに最も近いボールの表面までの距離である。しかし実際のボールの位置はボールの中心であるため、Kinectからボールへのベクトルをボール半径分の長さを延長した位置となる。以上から求めたデータに対して、あらかじめ求めた外部・内部パラメータから並進行列、回転行列を用いて、カメラ座標系からコートの座標系へ変換処理を行い、コート上のボール位置を推定する。

### 5.2.3 プレーシオン認識

バレーボールのアタック練習において、トス動作を認識するためには、その1つ前のレシーブ(あるいはパス)動作から認識する必要がある。本研究ではエンドラインからネット方向へのベクトル成分を持つボールをパスされたボールと定義し、そのボールの速度ベクトルが鉛直下向き方向から上向き方向へ切り替わるタイミングをトス動作と認識する。

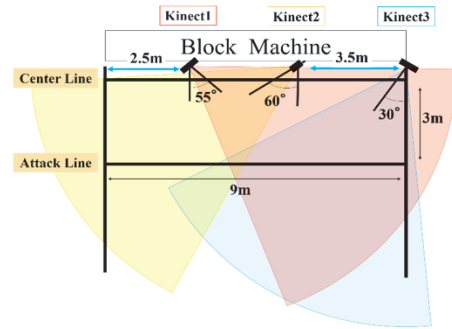


図12 Kinectの設置位置・角度と認識可能範囲  
Fig.12 Installation position, angle and recognizable range of Kinect

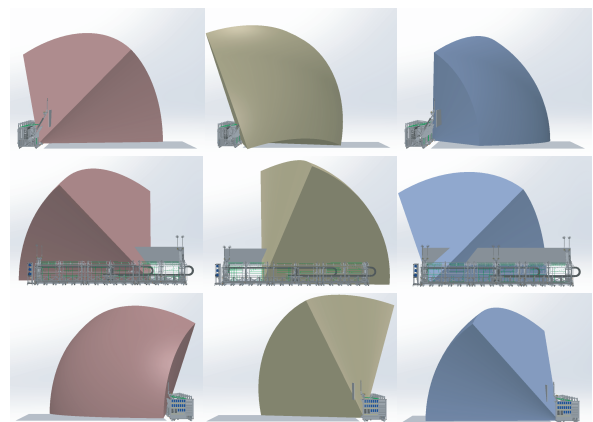


図13 Kinectの3D認識可能範囲  
(左側面図, 正面図, 右側面図)  
Fig.13 3D recognizable range of Kinect

### 5.2.4 打点位置推定

アタッカーの打点位置はトス動作後のボールの落下地点に依存する。よってトス動作検出後の僅かな時間から、ボールの軌道を物理法則から予測して落下地点を算出することでアタッカーの打点位置を推定することができる。原理上ではトス後のボール位置が2点定まることで放物線が算出できるが、より正確に打点位置を推定するため3点(トス動作後の3フレーム)を用いた。Kinectのフレームレートが30fpsであるため、トス後100ms以内に打点を推定することが可能である。なお落下地点の予測は、空気抵抗を考慮した斜方投射の運動方程式を用いて算出した。本アルゴリズムを適用した結果の例を図14に示す。

## 5.3 予測アルゴリズムの評価

5.2で述べた軌道予測アルゴリズムの精度を検証するための評価実験について述べる。バレーボール経験者1名を対象として、パスからのトスを左右に上げる実験を行なった。ネット中央付近にセッターの被験者を立たせ、もう1人の実験協力者がセッターにパスを出し(図15)、そのまま連続の流れで左右のサイド攻



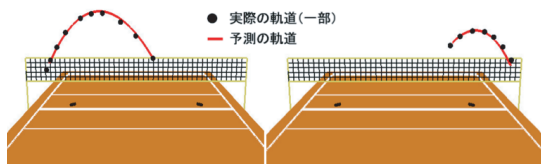


図 14 ボールの軌跡の予測  
Fig. 14 Prediction of ball trajectory

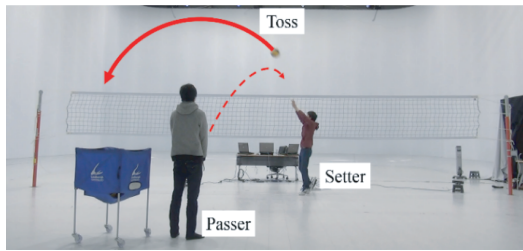


図 15 実験の様子  
Fig. 15 Experimental situation

表 3 打点位置予測の結果  
Table 3 Result of attack position prediction

	レフト方向	ライト方向
平均誤差	0.40 m	0.34 m
標準偏差	0.47 m	0.26 m

撃に対応するトスを上げさせた。左右それぞれ 30 回ずつ行い、Kinect によるトラッキングデータをボール軌道の真値とし、トス動作検出後の 3 フレームから予測するアタック位置との誤差を比較検証した。放物線において、打点高さが 250cm の時のコート座標をアタック位置とした。左右それぞれの平均誤差と標準偏差を表 3 に示す。

#### 5.4 自動モードへの発展と考察

表 3 の結果より左右それぞれの平均誤差が 40cm 以内に収まった。ここで本システムの許容誤差について述べる。本ブロックマシンシステムのマシン 1 体における両小指間の幅は約 50cm であり、サイド攻撃の際はブロック動作が通常 2 人によって行われる。よって平均誤差が 50cm 以内であれば、アタッカーの位置との誤差が 50cm 以内となり、アタックコースをマシンが防ぐことが可能なシチュエーションであるといえる。つまり高い確率で効果的なブロック形態を提示できるため、自動モードをブロックマシンシステムに導入することにより、さらに効率的なトレーニング成果が表出すると考えられる。

今回検証を行ったサイド攻撃に対して、自動モード適用の可能性を示したが、一方でセンター攻撃に対しては適用が困難であると考えられる。通常、A クイックや B クイックなどのセンター攻撃時のトス滞空時間

(ボールがセッターの手から離れてからアタックされるまでの時間間隔) は 500ms 前後と報告されている [18]。マシンの動作性能上、動作指令開始からブロック形態完成までの所要時間は、センター攻撃にあたるネット中央付近ではおよそ 500ms であるが、自動モードにおいて打点位置を予測するために 100ms の時間を要するため、センター攻撃のアタックに対して十分なブロック形態を提示することは難しい。一般に、不完全なブロックは相手のアタック決定率が上昇することが明らかとなっているため、練習としての効果が小さくなる [19]。またセンター攻撃に対するセッターのトスは、軌道が小さいために打点位置の推定が困難である。そのため今後は、ボール認識を用いたトス軌道からの打点位置予測だけでなく、Kinect を用いてアタッカー認識も同時に行い、助走動作を識別することで打点位置予測を行うシステムの確立が求められる。

## 6 まとめ

本稿では、ブロックマシンシステムを実際の練習において継続使用してトレーニングを行った選手への効果・有効性について検証を行った。本システムの使用日数を重ねるごとに選手のアタック失点率が低下していることを確認し、技術力・戦術的思考力の向上に貢献していること示した。またアタックされたボールがブロックに当たらずにコートに入るインの割合も高くなっているため、今後はマシンを使用した練習において、レシーバーを配置した状態でトレーニングを行うことで、実践の試合におけるアタック決定率の向上にも寄与できると推察される。

また練習合宿中において表出した問題点であるアタック位置とブロック位置の整合性に関して、この問題を改善するための位置ずれを補正する手法を提案・構築し、その評価を行った。ブロックマシンシステムとセンサシステムとの統合により、より効果的なトレーニングが行えるようになることが見込まれ、今後は補正有無の違いによる選手への効果検証を行う。

## 謝辞

本研究はスポーツ庁・ハイパフォーマンスサポート事業により支援を受けて行われています。

## 参考文献

- [1] 太田洋一, 射延友季, 三橋俊文: “バレーボール競技におけるブロックとセット取得との関係”, *Journal of health and medical science: JHMS*, Vol.5, pp.1-8, 2015
- [2] Kosuke Sato, Keita Watanabe, Shuichi Mizuno, Masayoshi Manabe, Hiroaki Yano, Hiroo Iwata: “Development a Block Machine for Volleyball Attack Training”, in *Proceedings of the 2017 IEEE*

- International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2017), pp.1036-1041, 2017
- [3] 會田宏, “ハンドボールのシュート局面における個人戦術の実践知に関する質的研究: 国際レベルで活躍したゴールキーパーとシューターの語りを手がかりに”, 日本体育学会体育学研究, Vol.53, pp.61-74, 2008
- [4] 酒井忍, 白山広樹, “バドミントン用アーム式発射マシンの開発”, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.822, 2015
- [5] 上村良介ほか, “人間と対戦可能なカーリングロボットに関する研究 第4報 人間との対戦とその結果”, スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス, B-36, 2014
- [6] Julian Stoev, Steven Gillijns, Andrei Bartic, Wim Symens, “Badminton playing robot - a multidisciplinary test case in Mechatronics”, 5th IFAC Symposium on Mechatronic System, 2010
- [7] Y. Huang, L. Churches, B. Reilly, “A Case Study on Virtual Reality American Football Training”, in Proceedings of Virtual Reality International Conference, No.6, pp.1-5, 2015
- [8] D. Ochi, A. Kameda, K. Takahashi, M. Makiguchi, K. Takeuchi, “VR technologies for rich sports experience”, in Proceedings of SIGGRAPH Emerging Technologies, No.21, pp.1-2, 2016
- [9] D. Thalmann, J. Lee, N. M. Thalmann, “An evaluation of spatial presence, social presence, and interactions with various 3D displays”, in Proceedings of 29th International Conference on Computer Animation and Social Agents, pp. 197-204, 2016
- [10] Miles, H.C., et al., “A review of virtual environments for training in ball sports”, Computers & Graphics, Vol. 36, No.6, pp.714-726, 2012
- [11] MM Jensen, et al., “Keepin’ it Real: Challenges when Designing Sports-Training Games”, in Proceedings of 33rd ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.2003-2012, 2015
- [12] Tal Amasay, “Static block jump techniques in volleyball: upright versus squat starting positions”, The Journal of Strength and Conditioning Research, Vol.22, No.4, 2008
- [13] 小林海ほか, “ブロッカーのポジショニングがコンペーション攻撃のディフェンスに及ぼす効果”, 日本バレーボール学会, Vol.15, No.1, pp.1-7, 2013
- [14] 中田学, 河村剛光, 青葉幸洋, 濱野礼奈, 菅波盛雄, “バレーボールにおける注視点の特性”, 日本バレーボール学会, Vol.18, No.1, pp.12-18, 2016
- [15] Hua-Tsung Chen, et al., “Ball tracking and 3D trajectory approximation with applications to tactics analysis from single-camera volleyball sequences”, Multimedia Tools and Applications, Vol.60, No.3, pp.641-667, 2011
- [16] H. Shishido, et al., “A trajectory estimation method for badminton shuttlecock utilizing motion blur”, in Proceedings of Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology, pp.325-336, 2013
- [17] OMRON 株式会社, 卓球ロボット FORPHEUS, <http://www.omron.com/innovation/forpheus.html> (accessed 2017-08-14)
- [18] 根本研, 山田雄太, 河部誠一, 伊藤雅充, 森田淳悟, 進藤満志夫, “バレーボールのブロック反応時間に関する研究 -シー&レスポンス能力の評価-”, 日本体育大学紀要, Vol.33, No.2, pp.109-117, 2004
- [19] 米沢利広, 今丸好一郎, 松本勇二, “バレーボールのブロックに関する研究: 大学女子チームにおけるブロックの三角ゾーンについて”, 福岡大学スポーツ科学研究

究, Vol.47, No.1, pp.23-32, 2016  
(2017年6月11日受付)

[著者紹介]

佐藤 綱祐 (学生会員)



2014年筑波大学理工学群工学システム学類卒業。現在同大学院グローバル教育院一貫制博士課程在学中。スポーツ工学, ロボット工学, 超人スポーツに関する研究に従事。

植田 真弘



2016年筑波大学システム情報工学研究科修士課程修了。同年美津濃株式会社入社。

渡辺 啓太



2011年筑波大学大学院人間総合科学研究科修士課程修了。前全日本女子バレーボールチームチーフアナリスト。現在日本バレーボール協会ハイパフォーマンス戦略担当。日本スポーツアナリスト協会代表理事。

水野 秀一



2014年長崎国際大学大学院健康管理学研究科修士課程修了。前全日本女子バレーボールチームコーチ。現在, ヴィクトリーナ姫路育成サポート部。

真鍋 政義



2005年大阪体育大学大学院スポーツ科学研究科修士課程修了。前全日本女子バレーボールチーム監督。現在, ヴィクトリーナ姫路ゼネラルマネージャー。

矢野 博明 (正会員)



1997年筑波大学大学院工学研究科修了。同年日本学術振興会特別研究員(PD)。99年筑波大学講師, 2007年より, 同大システム情報系准教授。力覚提示, 歩行感覚提示に関する研究に従事。博士(工学)。

岩田 洋夫 (正会員)



1986年 東京大学大学院工学系研究科修了。同年, 筑波大学構造工学系助手。現在, 筑波大学システム情報系教授。バーチャルリアリティ, 特に力覚提示, 歩行感覚提示, 没入型ディスプレイの研究に従事。工学博士。