

バレーボールのアタックトレーニングを拡張する
システムデザインに関する研究

2019 年 3 月

佐 藤 綱 祐

バレーボールのアタックトレーニングを拡張する
システムデザインに関する研究

佐 藤 綱 祐

グローバル教育院
エンパワメント情報学プログラム
筑波大学

2019 年 3 月

概要

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、工学技術を適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。

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効果率向上のためには、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。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kker、特に世界のトッププレイヤーのブロック動作を再現するロボットを提案し、アタクトレーシングを拡張する。

これまでもスポーツ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、そのほとんどが「クローズドスキル」に着目したシステムに留まっていた。一方でバレーボールをはじめとする球技スポーツにおいて、周囲の状況等の外的要因を把握し、次の動作を予測した上で自身の行動の意思決定し動作を遂行する力である「オープンスキル」が重要となる。しかし、オープンスキルを向上するためのインタラクティブなシステムはこれまでほとんど提案されていない。そこでオープンスキル向上を目的としたトレーニングシステム構築のための、実践的要求を工学的手法により解決する手法について説明する。特にブロック動作、およびトレーニングシステムにおいて重要となる要素に着目して議論し、実際の練習現場からの要求を工学システムへ落とし込む手順について触れ、システム指針、設計、構築、評価、運用を述べ、システムのデザイン手法を明らかにした。

本研究は全日本代表チームの練習合宿における本システムの継続使用を通じてその有効性を評価した。特に練習目的に応じて適切なタイミングでブロック形態を提示することがアタクトレーシングにおいて重要であり、対象選手に相手の状況を把握させ、動作を予測させるためのシステム構築が重要であることが明らかとなった。本論文においてその意義について議論し、今後の展望について述べた。

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	本研究の目的	5
1.3	本論文の構成	6
第2章	関連研究	7
2.1	スポーツトレーニングにおける工学システム	7
2.2	従来のアタクトレーニングにおける問題点	10
第3章	ブロッカーの身体的特性を考慮したブロックボード	11
3.1	ブロッカー選手の動作解析	12
3.1.1	2視点映像による3次元位置推定	12
3.1.2	ブロック動作の時系列解析	13
3.2	手指の曲げ応力	13
3.2.1	手指の曲げ応力計測実験	14
3.2.2	プロトタイプ試作	15
3.3	腕の押し込み応力	16
3.3.1	前腕の押し込み応力計測	16
3.3.2	プロトタイプ試作	16
3.4	ブロックボード	17
3.4.1	システム構成	18
3.4.2	フィールド実験	19
3.5	本章のまとめ	20
第4章	ブロック動作提示システム	21
4.1	ブロックマシン1号機	22
4.1.1	設計指針	22
4.1.2	システム構成	23
4.1.3	マシン単体のハードウェア構成	23

4.1.4	システム制御手法	25
4.1.5	マシン間協調動作	26
4.1.6	アプリケーションソフトウェア	27
4.1.7	セットアップの容易化	29
4.1.8	実運用への対応	30
4.1.9	実運用による評価	30
4.1.10	結果と考察	31
4.1.11	選手・コーチからのフィードバック	33
4.1.12	ブロックマシン1号機のまとめ	35
4.2	ブロックマシン2号機	36
4.2.1	設計指針	36
4.2.2	システム全体の構成	36
4.2.3	マシン単体のハードウェア構成	38
4.2.4	システム制御手法	40
4.2.5	GUIアプリケーションソフトウェア	40
4.2.6	動作性能評価	44
4.2.7	実運用による評価	46
4.2.8	ブロックマシンを使用した選手への影響	53
4.2.9	タブレット操作精度に関する検証	58
4.2.10	考察	60
4.3	男子選手への対応	62
4.3.1	設計指針	62
4.3.2	システム構成	63
4.3.3	実運用による評価	65
4.3.4	考察	70
4.4	本章のまとめ	70
第5章	リアルタイムトラッキングによる自動制御システム	73
5.1	研究背景	73
5.2	設計指針	74
5.3	選手位置軌跡を用いたアタック位置予測	75
5.3.1	選手位置推定手法	75
5.3.2	クイック攻撃における実験	78
5.3.3	考察	80
5.4	トス軌跡を用いたアタック位置予測	85
5.4.1	ボール位置推定手法	85

5.4.2	位置推定精度実験	86
5.4.3	トス軌道予測モデル	87
5.4.4	実験	89
5.4.5	考察	90
5.5	ブロックマシンとの統合実験	91
5.5.1	実験	93
5.5.2	考察	95
5.6	本章のまとめ	96
第 6 章	考察	98
6.1	スポーツ科学	98
6.2	人間情報学への貢献	102
6.3	スポーツ分野におけるシステム構築手法	103
6.4	今後の展望	105
6.5	他のスポーツ種目への適用可能性	107
第 7 章	結論	108
	謝辞	110
	参考文献	111

目 次

1.1	従来のアタックトレーニングシステム (株式会社モルテン社製, スパブ ロなど)	3
1.2	従来のスポーツトレーニングシステムのカテゴライズ	4
3.1	2 視点撮影した映像から抽出した画像 (エンドライン後方)	12
3.2	2 視点からコート座標系への変換	13
3.3	ブロック動作解析 (上: 高さ推移, 下左: 腕の内外転動作, 下右: 腕の 前傾動作)	14
3.4	指の曲げ応力計測実験の様子 (左) とその結果 (右)	15
3.5	曲げ応力再現のためのプロトタイプ	15
3.6	弾性測定器 (左) と前腕・ウレタンゴムの弾性値 (右)	17
3.7	ブロックボード外観 (左) と各自由度 (右)	18
3.8	手指モデルの改良詳細図	19
3.9	ブロックボードを使用したアタック練習の様子 (左: 1 枚ブロック, 右: 2 枚ブロック)	20
4.1	ブロックマシン 1 号機のシステム全体外観	22
4.2	ブロックマシン 1 号機のシステム構成図	23
4.3	マシン単体のハードウェア構成図	24
4.4	腕部における衝撃吸収機構	25
4.5	マスタスレーブによるマシン間協調動作	27
4.6	システム操作用 GUI アプリケーション	28
4.7	ブロック形態指定後ウィンドウ (左: レフト側, 右: ライト側)	29
4.8	ミドルマシンの初期移動	30
4.9	実際の練習現場におけるブロックマシン 1 号機の運用 (左: レフト 1.5 枚, 中: レフト 2 枚, 右: レフト 3 枚)	31
4.10	アタック結果の分類 ((1) イン, (2) ワンタッチアウト, (3) シャットアウ ト, (4) アウト)	32
4.11	2nd Tempo と 3rd Tempo 毎のアタック結果の割合	33

4.12	短くなったトスにおけるアタック-ブロック位置誤差	34
4.13	ブロックマシン2号機のシステム全体外観	37
4.14	ブロックマシン2号機のシステム構成図	37
4.15	マシンの機構詳細 ((a) 外観, (b) ジャンプ機構, (c) 前傾機構と腕内外転機構, (d) 移動機構)	38
4.16	サイド攻撃に対応した機能 (表示はレフト側)	42
4.17	Fig. 4.16 でのパターン選択後のパラメータ詳細変更機能	42
4.18	クイック攻撃, バックアタック攻撃に対応した機能	43
4.19	ブロック枚数指定毎のブロック形態の提示の概念図	43
4.20	ミドルブロッカーのブロック動作における頭部軌跡	45
4.21	ミドルブロッカーとミドルマシンの横移動動作の時間推移比較	45
4.22	試合映像を用いたブロック形態実現可能性の検証 (サイド攻撃に対する2枚ブロック)	47
4.23	実際の練習現場におけるブロックマシン2号機使用の様子 1((1) クイック攻撃1枚, (2) クイック攻撃1枚, (3) クイック攻撃2枚)	48
4.24	実際の練習現場におけるブロックマシン2号機使用の様子 2((4) バックアタック攻撃3枚, (5) サイド攻撃1.5枚 (レフト), (6) ライト攻撃1.5枚 (ライト))	49
4.25	アタックシーンにおけるブロッカーの認識・判断・選択・実行	53
4.26	サイド攻撃における各選手毎のアタック失点率の推移	55
4.27	選手Aの各日におけるアタック結果内訳	56
4.28	クイック攻撃における各選手毎のアタック失点率の推移	57
4.29	タブレット操作によるブロック位置指定精度 (左: 成功例, 右: 失敗例)	58
4.30	タブレットPC操作者によるタブレット操作指定精度の推移	59
4.31	合宿練習期間中における前後半別のアタック失点率とタブレット操作指定精度	60
4.32	国際試合における男子ブロッカーのブロック高さ (左: ブラジル, 右: ロシア)	62
4.33	ブロックマシン男女兼用化におけるシステム概要図 (男子公式高さにおける初期姿勢)	63
4.34	ブロックマシン男女兼用化におけるマシン単体概要図	64
4.35	各目標ジャンプ高さにおけるストローク推移	65
4.36	ゴムの弾性を用いた衝撃吸収機構 (肩関節部: 赤と青で示した部分を分離)	66
4.37	サーブマシンを用いた強度・耐久性試験	66

4.38	実際の練習現場におけるブロックマシン男女兼用化システム使用の様子	67
4.39	男子選手の主観評価値	68
5.1	OpenPose により得られる 18 特徴点	75
5.2	選手位置推定アルゴリズム	76
5.3	トス動作認識と時間余裕	77
5.4	クイック攻撃の種別	78
5.5	クイック攻撃における時間余裕	79
5.6	アタック位置予測の例示 (赤丸: アタッカーの軌跡 20 点, 緑丸: トス動作認識時のセッターの位置, 黄色丸: 実際のアタック位置, 赤線: 3 点近似予測線, 緑線: 4 点近似予測線, 青線: 5 点近似予測線)	81
5.7	アタック位置予測の誤差 RMS	82
5.8	予測成功率 (マシン 1 体分)	82
5.9	予測成功率 (マシン 2 体分)	82
5.10	アタック位置予測の誤差 RMS	84
5.11	予測成功率 (マシン 1 体分)	84
5.12	予測成功率 (マシン 2 体分)	84
5.13	YOLO を用いたボール領域の推定	86
5.14	3 次元位置推定誤差	87
5.15	予測精度実験環境	89
5.16	推定されたトス軌道例 (上段: レフト側, 下段: ライト側)	90
5.17	トス落下点予測精度	91
5.18	ボール領域探索のための初期範囲	92
5.19	クイック攻撃に対するマシン自動動作 (上: A クイック, 中: B クイック, 下: C クイック)	94
5.20	サイド攻撃に対するマシン自動動作 (上: 通常のサイド攻撃, 下: トスが短くなったサイド攻撃)	95
6.1	代表的な球技スポーツにおける選手 1 人辺りの面積 (卓球はコート (台) 内だけでなく, 周辺領域も含むめてプレーするため参考値)	99

表 目 次

4.1	ブロックマシン 1 号機の使用回数	31
4.2	ブロックマシン 2 号機の各機構におけるモータ, 減速比	39
4.3	サイド攻撃における各選手の使用回数	55
4.4	クイック攻撃における各選手の使用回数	57
4.5	タブレット PC タップ回数の推移	59
4.6	男子チームにおける使用回数	67
5.1	試合映像と練習映像の比較	74

第1章 序論

1.1 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 [1][2][3] や新しい用具の開発・既存用具の改良 [4][5][6], 戦略分析・戦略立案 [7][8][9] など多岐にわたるアプローチに関して、工学技術を適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。また、試合中におけるジャッジングの分野では、テニスやクリケット、サッカーなどで Hawk-Eye[10][11] による審判の判定補助を担うシステムが活用されている。さらに、試合中継の分野では、自由視点映像技術を用いた映像配信技術 [12][13] が確立されつつある、スポーツのあらゆる分野で工学の技術や知見が活かされている。上記の動きは大学レベル以上、特にプロチーム・クラブチームや代表チームに関わる現場、選手を対象として研究開発が行われている。またスポーツ庁ハイパフォーマンス・サポート事業では、オリンピック・パラリンピック競技大会において、トップレベルの競技者が確実にメダルを獲得することができるよう、アスリート支援や研究開発など多方面から専門的かつ高度な支援を戦略的・包括的に実施する事業が行われている [14]。本研究は 2013 年にハイパフォーマンス・サポート事業(当時、文部科学省マルチサポート事業 [15]) および公益財団法人日本バレーボール協会より委託を受けた。練習現場からの要望として、バレーボール女子日本代表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意見が挙がった。

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効果率(=(得点-失点)/打数)向上 [16] のためには、被ブロック率を抑制し、攻撃力を向上す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 [17], 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 [18], 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、アタック練習の練習内容を

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、バレーボールにおけるアタックトレーニングを拡張するシステムを提案する。

本論文で用いる“トレーニングの拡張”は、従来のトレーニング手法では習得できない、あるいは習得が困難な技能を向上させる基盤を構築し、選手の技能向上へ繋げること、と定義する。以降、スポーツ分野におけるこれまでのトレーニング手法を概観するとともに、従来のバレーボールにおけるアタックトレーニング手法の欠点を整理する。本稿で提案するシステムを用いたトレーニングを行うことで、これまで困難であった練習現場における、試合を想定したシーンの状況生成および身体性を伴うインタラクション、および精度の高い繰り返し動作による反復練習が容易に可能となる。

スポーツ分野における運動スキルの分類手法として、周囲の環境の安定性および状況の予測可能性に基づいて、「クローズドスキル」と「オープンスキル」に分類することができる[19]。クローズドスキルは、外的要因に左右されない状況下で発揮される技術、オープンスキルは外的要因に左右される状況下で発揮される技術であるといえる。この外的要因とは、相手選手の動きやボールの動き、コート状況、天候など様々な要因が考えられる。例えばゴルフや体操、陸上競技などはクローズドスキルが[20]、サッカーやバレーボール、柔道などはオープンスキルが[21]特に重要な要素となる。クローズドスキルはあらかじめ決められた、あるいは反復練習などにより習熟した運動パターンを一貫して、信頼性高く再現できるかが重要である[22]。これに対してオープンスキルは対戦相手やシーンの状況にあわせた運動パフォーマンスが要求され、運動スキルや認知スキルに加えてアスリート自身の意思決定を伴いながら運動を制御することが重要であるといわれている[23][24]。

バレーボールのアタックシーンに着目すると、必要となるスキルは特にオープンスキルである。なお本研究では、一定レベルに技能が習熟している選手を対象とするため、一般的なアタック技能(ボールを強く打つ技能、狙ったコースに打つ技能、助走動作から踏み込んで高く飛ぶ技能など)は十分に有しているとする。オープンスキルが重要となるアタック動作における外的要因として、さらに2つの要因に分類することができると考えられる。1つ目が自コート要因であり、2つ目が相手コート要因である。自コート要因は、アタッカー側のコート内で生じる外的要因のことを指し、アタッカー視点で考えた時に味方セッターとの位置関係やトスの質(ボールの高さや速度、回転など)が挙げられる。また相手コート要因は、ブロッカー側のコート内で生じる外的要因のことを指し、アタッカー視点で考えた時に相手ブロッカーの形態(ブロック位置や高さ、手指や腕部の形状など)や相手レシーバーの位置が挙げられる。つまりバレーボールのアタックシーンは、自コート要因、相手コート要因の様々な外的要因を考慮し、情報量の多い状況下、時間的・空間的に制約のある中で競技を行わなければならない。

従来の練習現場における実践的なアタクトレーニングでは、練習効果が不十分であるといえる。一般的にアタクトレーニングは、チームメイトやコーチ・指導者などがブロッカーの役割として練習相手となるが、問題点として3つ挙げられる。1つ目はスキルレベル、2つ目は再現性、3つ目は多様性である。

1つ目に関して、スキルレベルの高いブロック形態(ブロックの完成スピード、高さ、戦略性など)を練習現場において再現・提示することは困難である。一般的に同一チームに所属する選手同士ではスキルレベルが均衡していると考えられる。また代表チームにおいては、自身のスキルレベル以上の選手は国内に在籍しない。より技能の高い選手を相手にトレーニングを行う、という状況を生成することができない。これらを解決するために、ネット上部に高く出現する板状の用具を用いて高さのあるブロックを模擬(Fig. 1.1)することや、高さのある台の上にブロッカーが乗ることで高さのあるブロックを再現する試みがなされている。しかし、前者は実際のブロック形態の再現性が低く、また後者は動きの再現性が低い。

2つ目に関して、スポーツ技能向上の基本は反復練習であるが、同一シーンを再現することは非常に困難である。例えばサイド攻撃において、相手ブロック2枚が任意の形態で出現し、それに対してアタッカーがアタックを行なった状況を想定する。このアタック結果の良し悪しに関わらず、アタッカーは自身のアタック動作を振り返り、従来のトレーニングでは同一の状況でアタクトレーニングをすることが基本であるが、再度同一のブロック状況を作り出すことは困難である。練習相手に全く同じ動作をするよう指示をした場合でも、少なくとも完全な再現は不可能である。

3つ目に関して、アタックシーンにおいて、多様なブロック形態に対して日々トレー

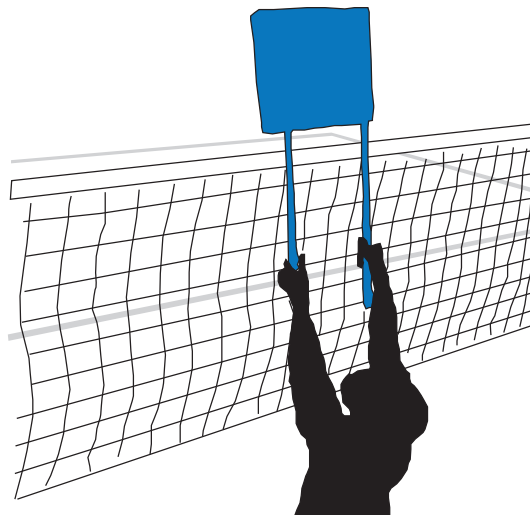


Fig. 1.1: 従来のアタクトレーニングシステム (株式会社モルテン社製、スパブロなど)

ニングを行い、事前に体感しておくことは重要であるが、従来の練習現場において様々なブロック形態を指導者や選手間で提示することは困難である。また選手毎にスキルレベルが異なるため、各選手の適切なスキルレベルに応じた状況を生成することも重要である。さらに、選手は練習日毎でスキル向上などにより変化を伴うが、これらに対応することができていない。

これまでもスポーツ(特に球技スポーツ)におけるトレーニング支援のためのシステムが開発されてきた。例えば、サッカーのフリーキックにおける壁を再現するシステムや、野球のピッチングマシン [25] など以前から広く普及している。他にもサッカーのPKを自動で止めるロボット [26] や、卓球のピンポン球を自動で打ち返すロボット [27]、バドミントンのシャトルを自動で打ち返すロボット [28] など様々なスポーツ種目において多様なシステムが提案・開発されてきている。先述したクローズドスキル・オープンスキルを横軸に、研究開発レベル・実用レベルを縦軸とすると、これまでのスポーツトレーニング支援のためのシステムは Fig. 1.2 に示す位置にプロットされる。実用的なものだけでなくエンターテインメントを目的としたシステムも含まれるが、従来提案されているシステムでは、より実践的なシステムで、オープンスキルのトレーニングが可能であり、上記の3つの問題点(スキルレベル、再現性、多様性)を解決する手法はこれまでほとんどみられない。また、特にトップアスリートのプレーや動作を再現し、実際の練習現場で活用されているシステムはほとんど見受けられない。なぜならトップアスリートのプレーや動作を再現するためには、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ためである。そこで本研究ではブロック動作において重要な要素に着目

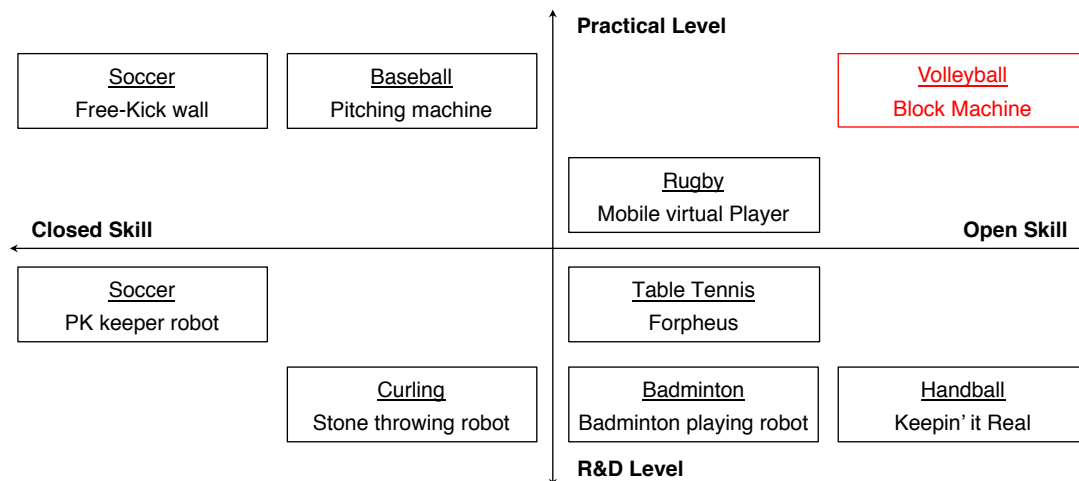


Fig. 1.2: 従来のスポーツトレーニングシステムの Kategorizatsiya

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から構成されるトレーニングシステムを提案する。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チューニングによりあらゆる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。想定される相手選手の動作再現、繰り返し動作による再現性、多様な状況生成によりバレーボールにおけるアタクトレーシングを拡張する。

1.2 本研究の目的

本論文は、バレーボールのアタクトレーシングを拡張するための実践的要求を工学的手法により解決する手順について説明する。なお、実際の練習現場(日本バレーボール協会含む)からの実践的要求は以下の通りであった。

1. 3体程度の機械が横にスライドして動き、ブロックする
2. ネット下にレールがあり、そのレール上を選手大の人形がスライドして動く
3. アメリカやブラジルなどのトップチームのブロック高さを想定
4. センサーを介した反応の良さ、腕関節の動き、細部の作り

以上を踏まえて、要求定義からシステムの設計、構築、評価を行うことで、システムのデザイン手法を明らかにする。特に本研究ではトップアスリートに着目し、従来のトレーニング手法では困難であった練習要素を拡張するためのトレーニングシステムを提案する。特に1.1節で述べた従来手法の3つの問題点の内、1つ目のスキルレベルは最重要課題であり、世界トップレベルのブロック高さ、スピード、戦略性に対するアタック打ち分け能力が従来のトレーニング手法では習得が困難であった。前述の通り、バレーボールのアタックシーンを想定するとオープンスキルの向上が重要と考えられるため、自コート要因・相手コート要因が変化する中での相手状況を生成し、練習現場からの実践的な要求を機能としてシステムへ落とし込む手順について明らかにする。その上で本手法の有効性、学術的な意義、スポーツ工学への貢献について議論する。

1.3 本論文の構成

本論文は全7章で構成される。

第2章では関連研究として、従来のスポーツ科学における視点、スポーツ工学の例などについて紹介し、従来手法の課題を整理するとともに、バレーボールのアタックトレーニングにおける問題点を整理する。

第3章では相手コート要因を統制した中で、自コート要因のみが変化する状況におけるアタックトレーニングシステムとして、ブロックボードについて説明する。ブロックボードはブロッカーの身体的特性を考慮したシステムであり、システムの要求整理から設計、構築について説明する。

第4章では第3章で説明するブロックボードを発展させ、自コート要因・相手コート要因ともに変化する状況下におけるアタックトレーニングシステムとして、ブロックマシンについて説明する。ブロックマシンはブロック動作を提示するシステムであり、特に女子日本代表チームを対象としたブロックマシン1号機、2号機、および男子日本代表チームへの適用を試みた男女兼用化について、それぞれシステムの要求整理から設計、構築、運用、評価について説明する。

第5章では第4章で説明するブロックマシンの練習現場における運用を通じて表出した問題点を解決する手法であるトラッキングシステムについて説明する。リアルタイムでボール・選手の位置をトラッキングし、ブロックマシンを自動で制御する手法について、設計から構築、評価について説明する。

第6章ではスポーツ科学に関する先行研究を概観するとともに全体のまとめの考察をして、本システムのアタックトレーニングとしての有効性を整理する、また人間情報学への貢献、スポーツ分野においてインタラクティブシステムを構築するためのシステム要件の考察、今後の展望、本研究で得られた知見に基づいた他のスポーツ種目への適用について考察する。

第7章で本研究の結論について述べ、アタックトレーニングを拡張するシステム要件として明らかになったことについてまとめる。

第2章 関連研究

本章では，これまで提案されているスポーツトレーニングにおける工学システムの事例について紹介し，従来手法の課題を整理する．またバレーボールの練習現場におけるアタクトレーニングの問題点について整理し，解決すべき事項について議論する．

2.1 スポーツトレーニングにおける工学システム

近年，スポーツ分野におけるトレーニングシステムとして，様々な種目・役割として見受けられるようになった．いくつか例を挙げ，どのようなスキルの向上に貢献しているか整理するとともに，従来手法の課題を整理する．

最も受動的な手法で古くから練習現場において活用されているシステムとして，サッカーのフリーキックにおける壁を再現するシステムが挙げられる．このシステム自体が動作することはないが，キッカー自身のクローズドスキルを向上させる練習相手として広く用いられている．他に練習現場において広く活用されている事例として，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が挙げられる．これらの基本原理としては，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．実際の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であり，反復練習に最適である．これらはクローズドスキルを向上させる練習システムとして用いられている．

一方で，実際の練習現場において活用できる段階ではなく，研究開発レベルの事例として，バドミントンにおけるシャトルを自動で返球するシステムが挙げられる [28]．ステレオカメラと3軸の動作自由度を有するロボットから構成されるシステムであり，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，予測された落下位置に基づいてロボットが自動で動作し，シャトルをプレイヤーに打ち返すシステムが提案されている．スマッシュしたシャトルを自動で打ち返すことが可能であるため，トレーニングとして反復練習ができる一方，ロボットの自由度が限定されていることにより，返球されるシャトルの軌道が実践的でないことや，オープンスキルの

向上には活用できない。バドミントンのスマッシュ時には、相手コート要因である相手選手の位置・姿勢を認識し、動きを予測した上で次の動作を実行しなければならない。相手選手の位置情報がロボットにより提示されない以上は、バドミントンの競技力向上に必要なオープンスキルの習得には不十分なトレーニングシステムであるといえる。

他の事例として、卓球におけるピンポン球を自動で返球するシステムが挙げられる [27]。認識システム (認識手法は非公開) とパラレルリンク機構を含む計 5 自由度を有するロボットから構成されるシステムであり、バドミントンのシステムの手法と同様、リアルタイムにピンポン球の位置を認識して軌道を予測し、軌道に基づいてロボットが自動で動作し、ピンポン球をプレイヤーに打ち返すシステムが提案されている。自動でピンポン球が返球されるため反復練習が可能であり、また認識システムがプレイヤーの技能を判定をするため、プレイヤーの技能に適した難易度でピンポン球が返球される。一方で、バドミントン同様、スマッシュ時には相手コート要因である相手選手の位置・姿勢を認識し、空いているコースに打ち込むスキルが選手には要求される。ネットスポーツにおいてボールやシャトルなどを自動で認識し、システムが自動で返球する機能は、非熟練者に対する反復練習には適しているといえるが、熟練者は一定のスキルを身につけており、バドミントンや卓球のように特に高いオープンスキルが求められる種目に対しては、相手選手の身体性を再現し、選手位置や動きなどを視覚的に提示することでオープンスキル向上を目指すことが重要であると考えられる。

その他に、インタラクティブなシステムとして、サッカーのペナルティーキック (PK) を自動で阻止するロボット [26] や、カーリングのストーンを投球する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 [29] などが提案されている。前者はエンターテインメントを目的としたシステムであり、実際のサッカーのゴールサイズではないことや環境が統制されていることなどによりトレーニングシステムとしての役割は小さい。また後者は戦術の解析や立案などのトレーニングに対しては貢献できると考えられる。

近年は Computer Graphics(以下, CG) や Virtual Reality(以下, VR) 技術の発展により, Head Mounted Display(以下, HMD) や没入型ディスプレイに実際の試合のシーンやシチュエーションを想定した映像を提示し, トレーニングするシステムが多数提案されている [30][31][32][33][34][35]。例えば野球の例 [30] では, 事前に対戦相手の投手のピッチングデータ (投球時の身体動作や投球後のボールの球筋など) を計測し, 3 次元データとして取得しておく。これらのデータを HMD や没入型ディスプレイにより映像提示することで, 体験者は (想定された) バッターボックスに立ち, その投手の投球感覚 (ボールのリリースポイントやタイミングなど) を把握することができる。これまでは実際に対戦するまで相手投球のタイミングなどを合わせる事が難しいと

されており、1 番打者は相手投手の様子を何う役割であるといわれていた。しかしこの手法により、試合の前日や当日の直前に自身の身体を動かしながら体感し、感覚を合わせることが可能となるため、日本のプロ野球で導入している球団もいくつか報告されている。しかしその効果や有効性などに関しては報告されていない。またアメリカンフットボールの例 [31] では、VR 空間内に攻撃時におけるセットプレーの 3D モデルを構築し、HMD や没入型ディスプレイにより映像を提示する。体験者はクォーターバックのポジションに立ち、周囲の状況を認識した上で空いているスペースに適切にパスを送球するスキルをトレーニングすることができる。その他没入型ディスプレイを用いたバスケットボールにおけるフリースローの視覚フィードバックシステムなどが提案されている [36]。

これらの CG や VR 技術を応用した手法は実際の試合におけるシーン再現性が高く、特にオープンスキルが要求される球技などで有効であると考えられる。オープンスキルの反復練習が可能であり、また様々なシーンを想定して作り出すことも可能である。しかし一方で、HMD による映像提示は視野角の問題 [37] により、球技スポーツにおいて重要な知覚要素となる周辺視が犠牲となる。また、没入型ディスプレイによる映像提示は、映像の歪みや鮮明度の問題により、シーンの再現度が低下する。さらに両者に共通するのが、映像提示のみによるトレーニングシステムは、ボールや相手選手との物理的なインタラクションが困難である。特にバレーボールのアタックシーンにおいては、セッターからトスされたボールをどのように把握し、自身の身体をどのように動作させ、相手コート要因を把握した上でいかに適切にボールとインタラクションするかが重要である。またアタック後のボールとブロッカーのインタラクションも必須であり、ワンタッチやブロックアウトのように、その後の状況変化によってプレー結果が異なることが多々生じる。

上記背景を踏まえると、アメリカンフットボール用のトレーニングシステムである Mobile Virtual Player(以下、MVP)[38] は、オープンスキルを向上させる適切なシステムであるといえる。MVP は等身大の自走式バルーンロボットとそれらを操作するコントローラから構成されるタックル練習用システムである。指導者やコーチなどがロボットを操作し、周囲の状況に合わせた適切な動作をするようにコントロールされる。ロボット自体は人型形状ではないためにシーンのリアリティにはかけるが、時事刻々と変化するシーン状況を生成し、選手は次の動作を予測し、適切な動作(タックルなど)をするトレーニングが行える。これによりオープンスキルの向上へつなぐと期待されており、NFL(アメリカ合衆国のプロアメリカンフットボールリーグ)のチームの練習に採用しているチームも存在する。

2.2 従来のアタックトレーニングにおける問題点

従来のアタックトレーニングに関する研究について着目すると、モーションキャプチャシステムによるアタック時の3次元動作解析 [39][40] や床反力解析 [41], 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 [42][43] や、戦術的研究 [44], プレー中の注視点に関する研究 [45], データ解析のための画像処理に関する研究 [46], 知覚・認識スキルの熟練者・非熟練者間の相違に関する研究 [47][48] など多岐にわたって行われている, しかしこれらの研究は主に, データ取得, 傾向分析による選手へのフィードバックのみに留まり, 実際の練習現場において反映していくことは困難である.

1.1 節で説明した通り, 従来の練習現場における実践的なアタックトレーニングでは, 練習効果が不十分であるといえる. そこで本研究では, 2.1 節で説明したスポーツトレーニングにおける工学システムの例示と課題の整理に基づき, 先述した 1. スキルレベル, 2. 同一シーンの再現性, 3. 多様性に対応し, オープンスキルを向上させるためのインタラクティブなシステムを提案する. 特にトップアスリートのプレーや動作を再現し, 実際の練習現場で活用されるシステムを提案する. トップアスリートのプレーや動作を再現するためには, 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. そのためブロック動作において重要な要素に着目し, 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を提案する.

第3章 ブロッカーの身体的特性を考慮したブロックボード

本章では、1.2 節で述べた実際の練習現場からの実践的要求を満たす手順の第1ステップとして、実践的要求の「3. アメリカやブラジルなどのトップチームのブロック高さを想定」および「4. (略) 細部の作り」を解決するシステムについて説明する。システムの設計指針として以下の2点について考えられる。

1. ネット上部に出現する視覚情報が実際の環境を十分に再現していること
2. アタッカーとブロッカーとの間に物理的接触があること

1つ目に関して、アタッカー視点で攻撃シーンを想定するとき、ネット上部に出現する相手ブロック形態(特に腕部)の骨格が実際のブロッカーと同等である必要がある。アタッカーはセッターからトスされたボールを打つ前に、相手ブロック形態を認識して空いているアタックコースに打ち分けるスキルを練習する必要がある。

また2つ目に関して、ボールを介したアタッカーとブロッカーの物理的接触やアタック後のボールがブロッカーに当たった後のボール挙動を十分に再現する必要がある。ワンタッチやシャットアウト、ソフトブロックなど、アタック後のボール状況を加味した練習を行う必要がある。そのため第2章で説明したCGやVR技術を応用した映像提示のみではシステムの要求を満たさない。

そこで、これらブロッカーの身体的特性を再現するにあたり、システムの機構や動作自由度、またブロッカーの手指部や腕部の検討を行った。以下、本章では3.1 節で実際のブロッカーの動作解析からシステムの機構や動作自由度に関する検討について説明し、3.2 節でブロッカーの手指部に関して、3.3 節でブロッカーの腕部に関して身体的特性を計測し、3.4 節で上記を統合したプロトタイプシステムであるブロックボードに関して説明する。

3.1 ブロッカー選手の動作解析

ネット上部に出現するブロック形態の骨格情報を再現するため、実際のバレーボールの試合中におけるブロッカーのブロック動作を解析した。対象とした試合は、2013年に日本で開催された国際大会であるワールドグランドチャンピオンズカップにおけるブラジル対ドミニカ戦とした(東京体育館)。当時ブラジルはFIVB世界ランキングで1位に位置していたチームである。対象試合をエンドライン後方2視点(アリーナ後方, 2階通路)から撮影を行い、その映像を用いて実際のブロック動作の解析を行った。

3.1.1 2視点映像による3次元位置推定

ブロック動作解析のために、対象試合のエンドライン後方に商用カメラ(Sony社製, HDR-CX530V)を2台設置して撮影を行った(Fig. 3.1)。コート全体がカメラ画角内に収まるようにそれぞれのカメラにおいてズームして撮影を行った(解像度 1920×1080 pixel, 30fps)。2画像からの3次元位置推定手法として、山田らの手法を用いた[49]。同一シーンの2画像における対応点(8点以上の対応点)から、両カメラの内部パラメータ、外部パラメータを推定することが可能となる。また同時にその対応点の3次元位置(カメラ座標系)が算出される。上記対象試合は国際試合であり、事前にキャリブレーションを行うことが困難な撮影環境のため、対応点としてバレーボールコートの既知点を用いた。既知点は、アタックラインとサイドラインの交点4点、センターラインとサイドラインの交点2点、撮影点と反対側のエンドラインとサイドラインの交点2点、およびネット両端の白帯の上下端4点の計12点を用いた。これらの既知点を用いて推定された3次元位置座標を、カメラ座標系からコート座標系(Fig. 3.2)に変換し、2画像からのコート座標系における3次元位置を推定した[50]。

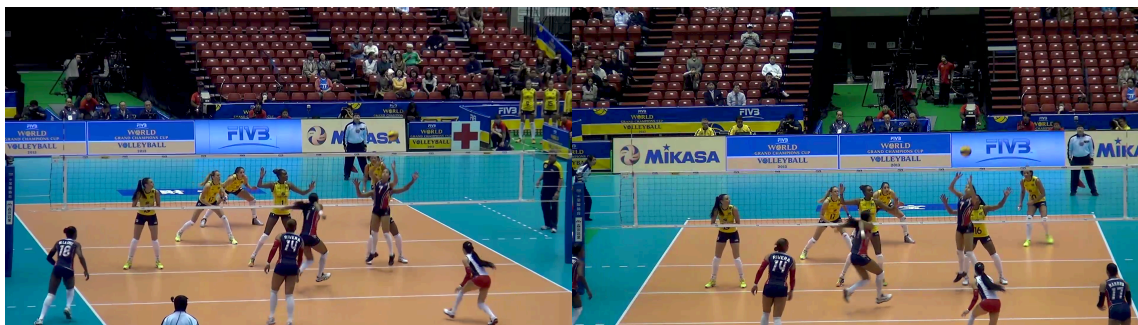


Fig. 3.1: 2視点撮影した映像から抽出した画像(エンドライン後方)

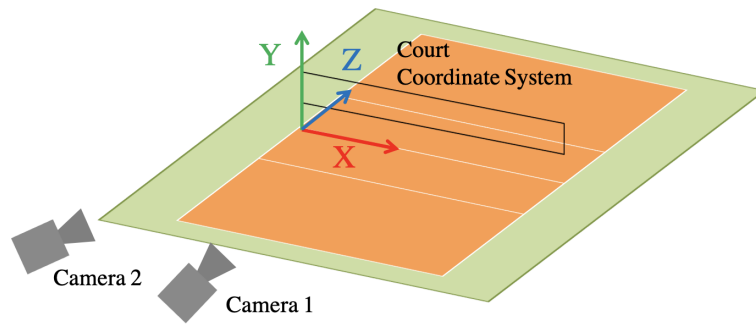


Fig. 3.2: 2 視点からコート座標系への変換

3.1.2 ブロック動作の時系列解析

試合映像よりサイド攻撃に対する2枚ブロック動作が行われた任意のブロックシーンを抽出し、各フレーム毎に3.1.1項で述べた手法を適用した。ブラジル代表チームにおけるミドルブロッカーの両手首と両肩を各フレーム毎に手動で画像座標を指定し、各フレームにおける両手首と両肩のコート座標系における3次元座標を推定した。ブロックシーンの一連の画像に対して3.1.1項の手法を適用することで、ブロック動作における両手首と両肩位置の時系列推移を推定した (Fig. 3.3)。Fig. 3.3(上)はブロック動作におけるジャンプ動作の踏み込みから着地までのフェーズでの両手首と両肩の高さ推移を、Fig. 3.3(下左)は腕の内外転動作の様子を、Fig. 3.3(下右)は腕の前傾動作の様子を表している。0-0.2 s 辺りの踏み込み時間を除いて概ね放物運動であり、また約0.5 mのジャンプ動作が行われていることがわかる。また手首の最高点は約2.7 mであり、両肩の内外転動作および前傾動作は最大45 deg 前後であることが観測された。

3.2 手指の曲げ応力

ブロックシーンを観測するとアタックされた後のボールがブロッカーの手指 (特に指先) に当たった後、一般的にボールの軌道は大きく変化する (ワンタッチ)。アタッカー側の視点からみて、ブロックの高さがある相手や、ブロック形態が揃っていて空いているアタックコースがほとんどない時には、故意的にブロッカーの指先にボールを当てブロックアウトを狙うシーンが多く観測される。また一方でブロッカー側の視点からみて、アタックの高さがある相手や、身長が低いセッターがブロックを行う時には、可能な限りアタックされたボールに少しでも触れるようにし、ボールのスピードを落としてレシーバに拾わせる (ソフトブロック) ことを狙う状況も考えられ

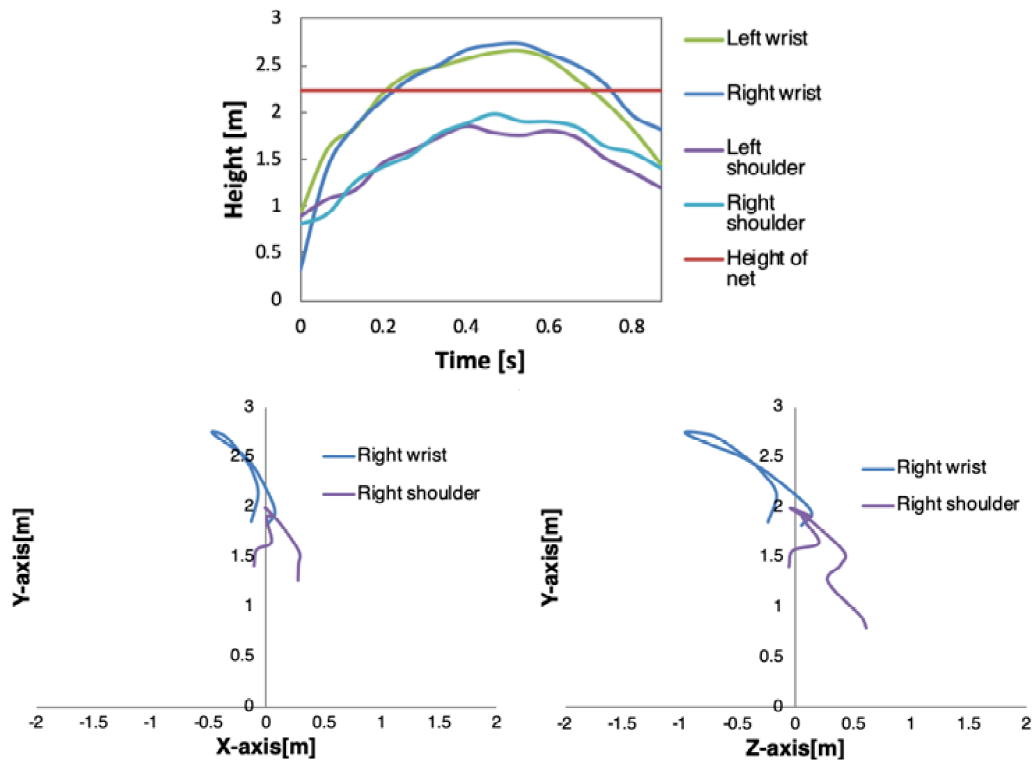


Fig. 3.3: ブロック動作解析 (上：高さ推移，下左：腕の内外転動作，下右：腕の前傾動作)

る。これらの戦略性を考慮すると、ブロッカー手指部のボールとの接触時における身体的特性を再現することは重要であるといえる。そこでブロッカーの手指部再現のため、特に手指の手の甲側への反り返りの特性に着目した。

3.2.1 手指の曲げ応力計測実験

手指の手の甲側への反り返りの特性として、手指の曲げ応力に着目した。手指の曲げ応力の計測にはフォースゲージ(テックジャム社製, ZP-500N)を用いた。被験者に Fig. 3.4(左)で示す姿勢に手指を置かせ、被験者の指を手の甲側に反り返る方向に引っ張りながら(図中赤矢印)、被験者にはその力に対抗するようにさせた(図中緑矢印)。この時の指先の基準点(0 cm)から40 cmまで、10 cm 毎に変位とつりあいの力の関係を計測した。4名の男性被験者の両手10本の曲げ応力を計測し平均値を算出した結果を Fig. 3.4(右)に示す。結果から指の曲げ応力特性として、変位とつりあいの力の関係は一定の比例関係であることが示された。

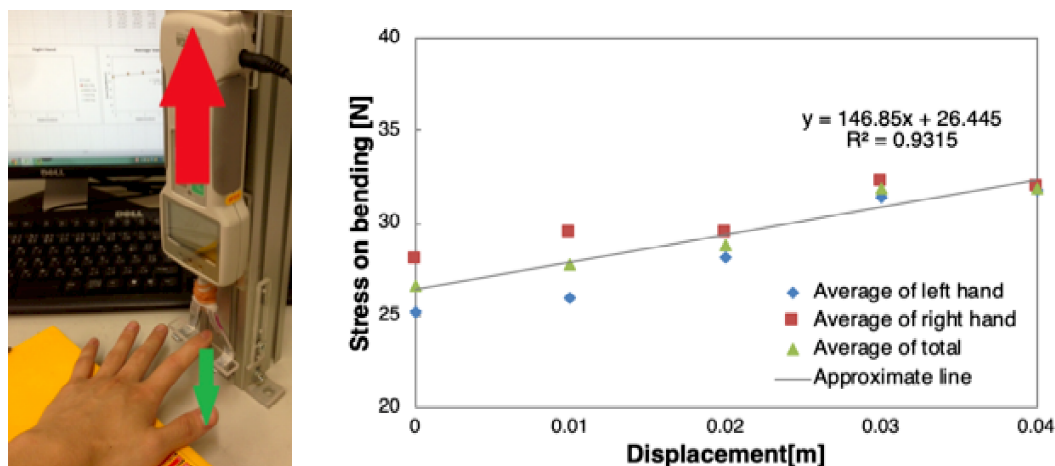


Fig. 3.4: 指の曲げ応力計測実験の様子 (左) とその結果 (右)

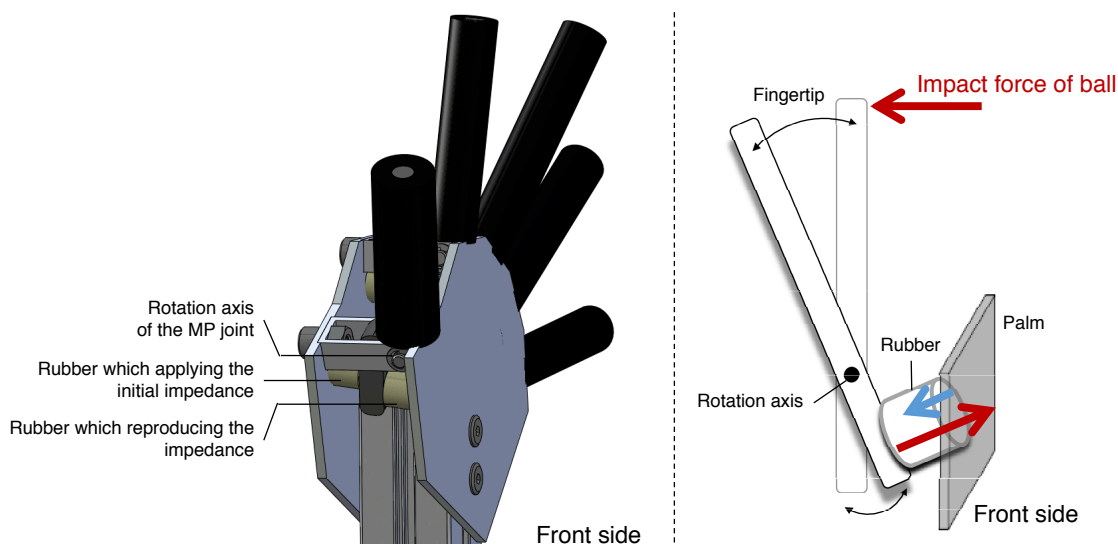


Fig. 3.5: 曲げ応力再現のためのプロトタイプ

3.2.2 プロトタイプ試作

3.2.1 項で述べた実験による指の曲げ応力特性を再現するため、ゴムの弾性を用いて曲げ応力を再現するプロトタイプを試作した (Fig. 3.5). 指を1本の剛体とみなし、自由度をMP関節における回転の1自由度とした. 指のMP関節に相当する箇所を回転軸とし、指先部の反対側にゴムを配置する. 指先部に力が加わった時、回転軸周りに剛体が回転し、てこの原理で反対側に配置したゴムが圧縮することで指の反り返り

応力を再現する．五指の長さを母指から 60, 70, 80, 70, 60 mm とし，3.2.1 項で求めた反り返り応力を十分に再現するよう，弾性値の近いゴムを用いた．

3.3 腕の押し込み応力

3.2 節と同様に，アタック後のボールがブロッカーの腕部に当たる時，腕部への当たる箇所や当たり方に応じて，その後のボール挙動が大きく変化する．アタッカー側の視点からみて，ブロックの高さがある相手や，ブロック形態が揃っていて空いているアタックコースがほとんどない時には，故意的にブロッカーの腕部の端にボールを当ててブロックアウトを狙うシーンが多く観測される．一方でボールが腕部の中心付近に当たり，コート内に落下するシチュエーションではその跳ね返りの挙動の再現が重要となる．どのような速度でどの辺りに落下するかによって，そのボールが拾われ，次のプレーに継続すること多いためである．これらを考慮すると，ブロッカーの腕部の身体的特性を再現することは重要であるといえる．そこでブロッカーの腕部再現のため，腕部の押し込み応力，および形状に着目した．

3.3.1 前腕の押し込み応力計測

腕部の押し込み応力として，ブロック時に最もボールの当たる頻度の高い箇所である前腕部に着目し，前腕の筋肉の押し込み応力の計測を行った．計測には力を計測するためのロードセル (共和電業社製, LMA-A-5N)，およびロードセルを押し込むための直動アクチュエータ (オリエンタルモータ社製, ELCM2F10K) から構成される弾性測定器 (Fig. 3.6(左)) を用いた．直動アクチュエータの制御およびデータの記録は PC 上で行い，制御周波数およびデータ取得は約 50 Hz で行った．

上記の弾性測定器を用いて，使用したロードセルの定格荷重である 0-5 N までの範囲において，直動アクチュエータを 0.1 mm 間隔で位置制御を行い，ブロッカーがブロックをするときに主にボールの当たる前腕の筋肉の押し込み応力を計測した．このとき，被験者には前腕に力をいれるように指示をした．また同時に，同等の弾性値を示すウレタンゴムの押し込み応力の計測・比較を行い (Fig. 3.6(右))，同等の特性を有する素材を決定した (CR 系硬さ 25)．

3.3.2 プロトタイプ試作

3.3.1 項で述べたウレタンゴム用いて，腕部の押し込み応力を再現するプロトタイプを試作した．腕部の形状として，Anatomography[51] において提供されている人体の

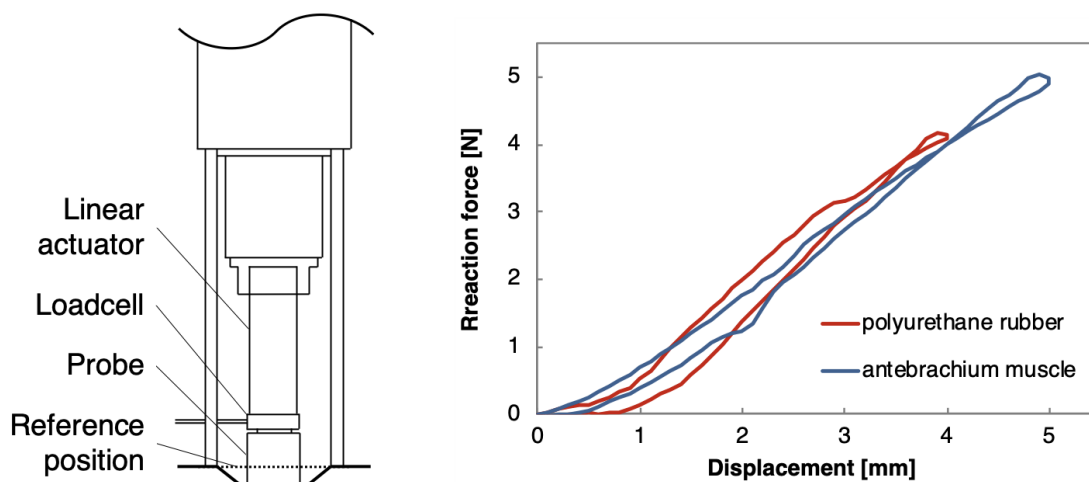


Fig. 3.6: 弾性測定器 (左) と前腕・ウレタンゴムの弾性値 (右)

標準 3D モデルの腕部のみを抽出するとともに、3D モデリングソフト (Metasequoia) を用いて腕部形状をブロックシーンにおける一般的な姿勢に変更した。このモデル形状をウレタンゴムにて成形を行い、30 mm 四方のアルミフレームを芯材として設置した。

3.4 ブロックボード

3.1 節, 3.2 節, 3.3 節を受けて、ブロッカーの身体的特性を考慮したシステムとして「ブロックボード」を製作した (Fig. 3.7(左))。ブロックボードは無動力でスタティックなトレーニング用具である。アタッカー視点からみて、相手コートネット際に複数台設置し、相手ブロック形態 (ブロック動作の完成された時におけるブロックの形など) を模擬するシステムである。アタッカーはブロック形態に応じて、セッターからのトスをアタックするトレーニングを行う。ブロックボードの手指部や腕部の端を故意的に狙い、ワンタッチを獲得することを練習する場面や、ブロック間 (各ブロックボードの間) や腕の間、ブロックの上など空いているコースによって打ち分けられるよう練習する場面に利用できる。あるいはレシーバーのための、ブロックされたボールを拾う練習にも利用できる。外的要因である相手コート要因が統制された状況下で、自コート要因に応じたトレーニングシステムとしての確立を目的とした。

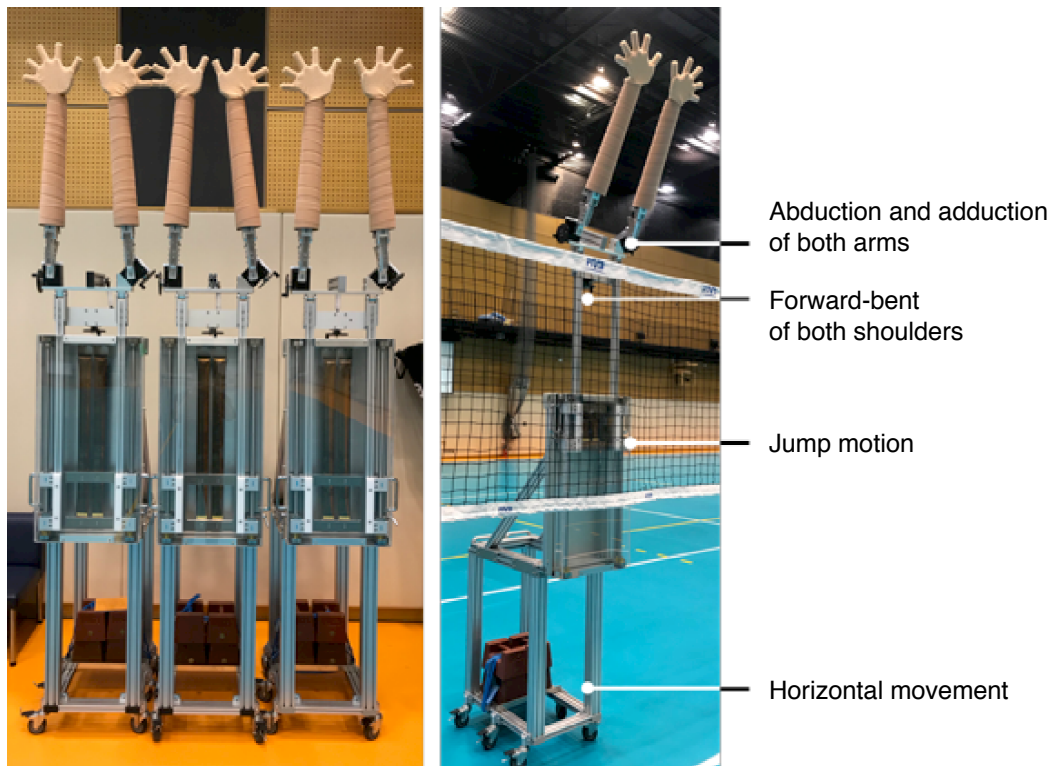


Fig. 3.7: ブロックボード外観 (左) と各自由度 (右)

3.4.1 システム構成

3.1 節における動作解析から、ブロックボードの動作要素を移動動作，ジャンプ動作，肩関節の前傾動作，左右各腕の内外転動作とした (Fig. 3.7(右))。人の動作自由度を考慮すると，他に肘関節や手首関節などの自由度が考えられ，これらの自由度を加味することでより忠実なブロック形態の再現が可能となる。しかし一方で，機構の自由度の増加に伴ってシステムの機構が複雑化するだけでなく，アタックによるボールの撃力に耐えるための強度が低下すると考えられる。また，実際のブロック形態ではネット上部に腕部が出現するとき，肩関節から指先にかけて伸展させた姿勢が一般的である。そのために自由度を限定したシステムにおいても，ブロック形態提示における影響は小さいものと考えられる。

ブロックボードの最下点時における指先高さは2,773 mm，ジャンプ動作のストロークは501 mmのため，最高点時では指先高さが3,274 mmとなる。また，腕の長さを850 mmとし，肩関節の前傾動作の可動域を前方に45 deg，左右各腕の内外転動作の可動域を ± 45 degとした。

各動作自由度は手動操作により任意の姿勢に変更可能であり、また肩関節の前傾動作と左右各腕の内外転動作に関してはセルフロック機構により、アタック後のボールが当たった後の姿勢の維持が可能である。ブロックボードの横幅は、人体と同等サイズである 400 mm としているため、3 体のブロックボードを独立に任意の姿勢で配置することで、任意のブロック形態を提示することが可能である。

3.4.2 フィールド実験

ブロックボードを実際の練習現場に設置し、フィールド実験を行った。全日本女子バレーボールチームの男性コーチ数名によるアタック試打の結果、ワンタッチやシャットアウト、ブロックアウトなど、実際のアタックシーンと同等の状況が提示できることが示され、また実験協力者であるコーチからの意見として「実際のブロッカーの時と(状況が)近い」といったフィードバック意見があった。また男性コーチによるアタックがブロックボードの腕に当たった後の姿勢の変化は観測されず、機構の耐久性に関しても有効性が確認された。

一方で、手指部の機構強度が不十分であることが明らかとなった。アルミ部材の接合部やゴムの耐久性がアタック強度に耐えることが困難であった。そこで代替手法として、3 mm 厚のポリカーボネートを手指の形状に切り抜き、4 枚重ねる手指モデルとした (Fig. 3.8)。再度フィールド実験を行った結果、ブロッカーの指のしなりを再現しつつ、十分な強度を有していることを確認したため、以降のシステムでは本手法を採用した。

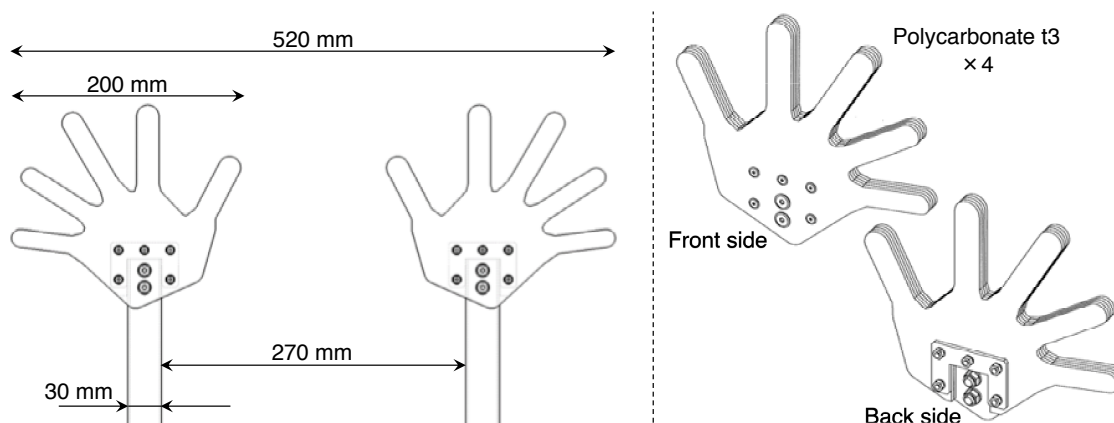


Fig. 3.8: 手指モデルの改良詳細図



Fig. 3.9: ブロックボードを使用したアタック練習の様子 (左：1枚ブロック, 右：2枚ブロック)

3.5 本章のまとめ

ブロッカーの身体的特性を考慮したシステムとして、ブロッカー選手の動作、手指の曲げ応力、腕の押し込み応力に着目したブロックボードを提案し、実際の練習現場におけるフィールド実験を通じてその有効性の検証を行った。ブロックボードは全日本女子、および全日本男子チームの実際の練習メニュー内にも組み込まれて使用されており (Fig. 3.9), 様々なブロックシーンを事前に生成し、トスに応じてアタックを打ち分ける練習が可能なシステムであることが、実際の練習における活用事例から明らかとなった。これらの結果より、オープンスキルにおける外的要因の相手コート要因が統制されている状況下において、自コート要因(セッターとの位置関係やトスの質)に応じて、様々な状況下で発揮される技術をトレーニングするシステムとして、有効であったといえる。また実際の練習現場からの実践的要求を満たす手順の第1ステップとして、実践的要求の「3. アメリカやブラジルなどのトップチームのブロック高さを想定」および「4. (略)細部の作り」を解決したシステムであるといえる。次章ではブロックボードを発展させたシステムについて説明する。

第4章 ブロック動作提示システム

本章では、1.2節で述べた実際の練習現場からの実践的要求を満たす手順の第2ステップとして、第3章の結果を反映させるとともに、実践的要求の「1. 3体程度の機械が横にスライドして動き、ブロックする」および「2. ネット下にレールがあり、そのレール上を選手台の人形がスライドして動く」および「4. (略) 腕関節の動き (略)」を解決するシステムについて説明する。

システムの設計指針として以下の4点について考えられる。

1. 手指を含む細部の身体的特性が実際の人間と同等であること
2. ブロッカーの腕の動きを十分に再現していること
3. 選手と同等の身長のマシン3体が実時間で状況生成すること
4. 複数人でアタックコースを限定させる組織的・戦略的なブロック形態が提示可能であること

1つ目に関して、3章で述べたブロッカーの身体的特性を考慮したシステムと同様、アタック後のボール状況を加味した練習をする必要があるため、アタッカーとブロッカーとのインタラクション、およびアタック後のボール挙動を十分に再現する必要がある。

2つ目に関して、3章で述べたブロックボードでは、事前のブロック形態の生成により、外的要因である自コート要因に応じた様々な練習を行える一方、相手コート要因である多様な変化の状況下で発揮される技術をトレーニングすることができない。そこで、実時間でブロッカーの腕の動きを生成し、ブロック形態を提示する必要がある。

3つ目に関して、一般的にアタッカーはブロッカーの動きを認識し、次の動作を予測した上でプレーの選択や実行を行う。よってブロッカーは所定の位置から実時間でブロック位置に移動する必要があり、その移動の速度に関しても実際のブロッカーと同等の動作を再現する必要がある。

4つ目に関して、トレーニングシステムとして重要な要素である、チームや練習の狙いや意図をシステムに反映させ、それに応じて各ブロッカーが連動してブロック動作を行うことで、トレーニング効果を見出す必要がある。

ブロッカーの身体的特性を考慮し、静的なトレーニングシステムとしての有効性を 3 章で示したが、ブロックボードでは実時間での状況生成および時系列の状況変化は提示困難である。そこでブロックボードの各関節部をモータ駆動により制御し、実時間で多様なブロックの状況を提示可能なシステム「ブロックマシン」について、システム設計、構築、評価、選手への影響を以下に述べる。

4.1 ブロックマシン 1 号機

4.1.1 設計指針

上記で述べたシステム要求を満たすシステムとして、ブロックマシン (Fig. 4.1) を提案する (以下、ブロックマシン 1 号機と呼称)。各システム要求に対して、設計指針は以下の通りである。

1 つ目に関して、3 章で述べたブロッカーの身体的特性を考慮したシステムであるブロックボードにおいて、その有効性が確認されたため、ブロックボードと同様の手法を採用する。

2 つ目に関して、3 章で述べたブロックボードの動作自由度、特にジャンプ動作、両肩の前傾動作、左右各腕の内外転動作をモータ駆動により実時間でブロック形態の生成・提示を行う。

3 つ目に関して、各マシンをレール上でモータ駆動させることで実時間でマシンの位置移動、および上記動作と合わせた状況生成を行う。

4 つ目に関して、各マシンが組織的・戦略的にブロック形態の提示を行えるようにするため、練習現場におけるコーチやスタッフなどの指導者がシステムを操作可能とするセミオートマチックな制御手法を提案する。

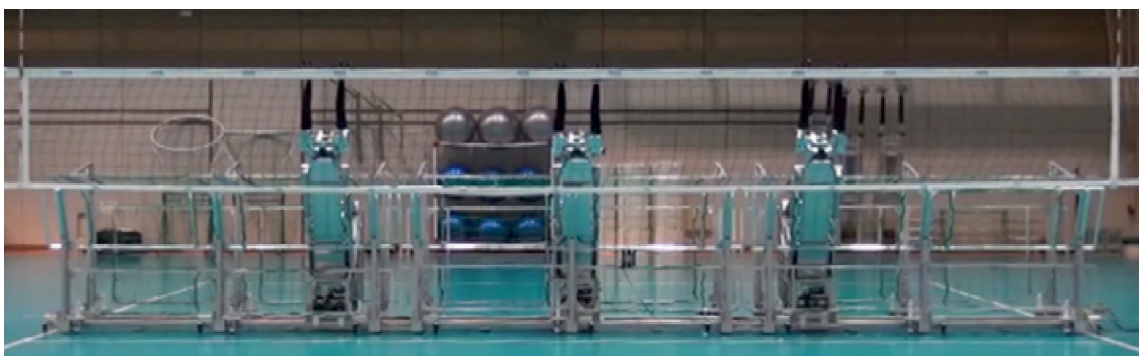


Fig. 4.1: ブロックマシン 1 号機のシステム全体外観

4.1.2 システム構成

ブロックマシン1号機はブロッカーの動作を再現するマシン3体，マシンが走行を行うためのレール，コーチやスタッフがシステムを操作するために用いるタブレットPCから構成される (Fig. 4.2)．バレーボールコート横幅が9 mであるため，レール幅はマシンが9 mの走行を行える可動域とした．レールと平行して銅製の給電レールを6系統配置し，各マシンにAC 100 V電源を2系統ずつ給電可能な構成とした．またシステム可搬性を向上させるため，レールを3 m毎に3つのモジュールに分離可能な構成とした．

システム全体として，横幅 9,120 mm，奥行幅 1,200 mm の設置寸法であり，システム設置側のアタックライン内に収まる．これによりシステム設置側の他の選手の妨げにならず，システム後方でレシーバー選手が配置についた練習を行うことも可能である．全体重量は概算で 1,000 kg 以上となるが，レール下部にキャスタを取り付け，3人以上の牽引によって容易に運搬が可能である．これにより，練習メニュー間でのシステムの設置・撤収を容易としている．また，選手やボールとマシンとの接触を防ぐために防球ネットによってシステム全体を覆った．各マシンにノートPCを搭載し，各マシン3体とタブレットPC間は無線LANルータを介してTCP/IP通信によって無線通信を行うことで，システム全体を制御する．

4.1.3 マシン単体のハードウェア構成

マシン単体の外観を Fig. 4.3 に示し，構成要素とその機構を述べる．各マシンの自由度はブロックボードと同様，左右横移動動作，ジャンプ動作，前傾動作，左右各腕内外転動作の5自由度を有する．各自由度を駆動するモータは統一してACサーボモータ (Panasonic 社製, 100 V, 400 W) を用いる，左右横移動動作のみ3軸駆動とし，マシン1体につき7つのモータを使用する．モータ駆動用のサーボアンプ，モータ制御回

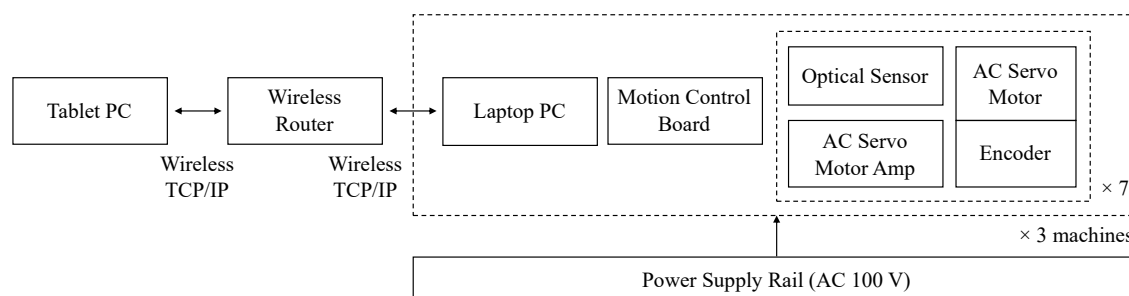


Fig. 4.2: ブロックマシン1号機のシステム構成図

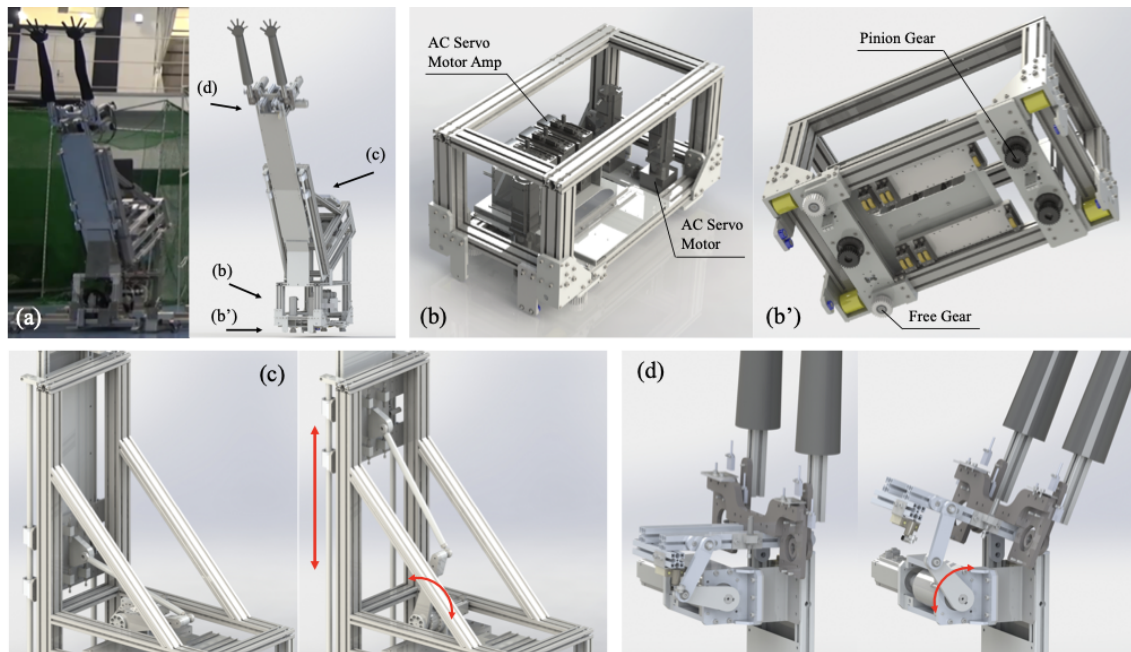


Fig. 4.3: マシン単体のハードウェア構成図

路基板, PC, キャリブレーション用センサなどは各マシンに配置し, レールと平行して配置された給電レールから供給される AC 100 V 電源によって各々が動作する. 以下, 各動作自由度に関して説明する.

左右横移動動作はラックアンドピニオン機構を採用した. レール側にラックギアを, マシン側にピニオンギアを配置する機構とした (Fig. 4.3(b)(b')). ピッチ円直径 $\phi 52$ mm, モジュール 2, 並歯のピニオンギア (小原歯車工業社製, SSG2-26J19) を用いた. モータが減速比 5 のギアヘッド付きとし, トルクを考慮してモータ 3 軸駆動とした. マシンにおけるヨー軸の回転モーメントの拘束力が低いため, フリーギアを追加で配置した.

ジャンプ動作は四節スライダクランク機構を採用した. スライダ部を 500 mm の可動域で上下させることでブロッカーのジャンプ動作を再現する (Fig. 4.3(c)). スライダのガイドとしてシャフト, リニアブッシュ (ミスミ社製, LHGS20-30) を用いて, ねじりや強度対策として 4 つのリニアブッシュによって構成される. 動作時の重力補償としてスライダ上部から定荷重ばねを, スライダ下部から押しばねを用いた. モータには減速比 50 の減速機 (ハーモニックドライブ社製, CSG-25-50-2UH) を取り付けた.

前傾動作は四節クランク機構を採用した. 直立 0 deg から前方 45 deg の可動域で前傾させることでブロッカーの腕が倒れこむ動作を再現する (Fig. 4.3(d)). 減速比 60 のセルフロック減速器 (庄司歯車エンジニアリング社製, SRE-006) を用いることで, ア

タックされたボールが腕部に当たるときの外力による姿勢の変化を防ぐ。

左右各腕内外点動作は前傾動作と同様の減速比 60 のセルフロック減速機を用いて、その出力軸が内外転動作に直結する。内外転角度は $\pm 45 \text{ deg}$ の可動域とした。

マシン単体のプロトタイプ試作によるアタック耐久性実験を行なった結果、アタック後のボールが腕の中心に当たり、ボールが跳ね返るシーンにおいて、跳ね返り後のボールの速度が実際の選手と比較して早いことが観測された。これはマシンの腕部の剛性が高いことが起因していると考えられる。そこで腕部にかかる肩関節周りのモーメントを、ゴム (硬度: ショア A32) による弾性で小さくする手法を採用しボールの跳ね返り速度を低減させた (Fig. 4.4)。

4.1.4 システム制御手法

トレーニングシステムとして、チームや練習の狙いや意図をシステムに反映させ、それに応じて各ブロッカーが連動してブロック動作を行うことで、トレーニング効果を見出す必要がある。そこで各マシンが組織的・戦略的にブロック形態の提示を行えるようにするため、練習現場におけるコーチやスタッフがシステムを操作可能とするセミオートマチックな制御手法を提案する。

本システムのセミオートマチックな制御手法は、事前にブロック形態をタブレット PC を用いて操作・指定することで各マシンの動作軌跡をプリセットし、セッターのトスのタイミングで動作開始トリガー信号をタブレット PC から送ることで、その後

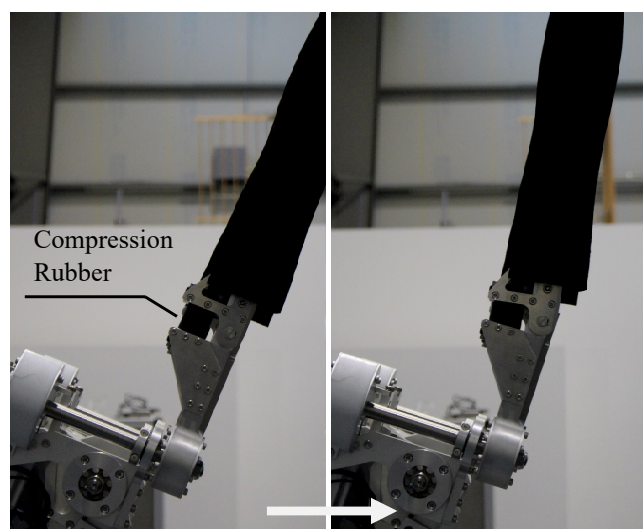


Fig. 4.4: 腕部における衝撃吸収機構

の各マシンは自動で動作する方式とした。

ここでバレーボールのブロック形態について整理する。攻撃側の視点でアタックをみると、大きく3つのパターンに分けることができる。サイド攻撃、バックアタック攻撃、クイック攻撃の3種類である。サイド攻撃は平行トスや山なりのトスをセッターがレフトやライト方向へ上げ、ブロック形態としては1.5枚もしくは2枚が多くみられる。ここでブロック1.5枚とは、ブロック2枚が完全な状態でブロックが提示されず、片方1枚のブロック位置やジャンプ高さなどが不完全な状態のブロック形態のことを指す。バックアタック攻撃は後衛の選手が打つために比較的滞空時間の長い山なりのトスとなる。そのため多くのシーンでブロック3枚がみられる。クイック攻撃は基本的には短く早いトスで行われるアタックであり、ブロックは1枚が多くみられる。その中で本研究ではまず、バレーボールの試合の中で最も多く用いられる攻撃手法であるサイド攻撃に着目した [52]。

各マシンにおける各軸の制御手法について説明する。3.1.2 項で明らかとなったブロック動作を各マシンにおいて提示する必要がある。一方で、軌跡データを観測すると、動作の開始と終了付近での加速度が非常に大きくモータ制御での提示が困難であることや、ブロックシーン毎に動作が大きく異なることなどから、一意に動作を決定づけることが困難であった。そこで各軸における提示軌跡として近似的に4.1式を用いることとした。時間経過に対する目標角度を決定づけ、目標角度に追従するように制御することでブロック動作を再現する。ブロックのタイミング(ブロック形態の完成時間)や各軸の大きさ(ジャンプ高さや前傾角度、左右各腕の内外転角度)は実際の試合中の映像を参考にし、4.1式のパラメータである μ と σ をあらかじめ決定づけた。

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left\{ -\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2} \right\} - t_0 \quad (4.1)$$

4.1.5 マシン間協調動作

3体のマシンが協調動作し、かつマシン間での干渉や衝突が生じないように、システム全体をマスタスレーブ方式によって制御した。操作者がもつタブレット PC をマスタ、各マシン搭載 PC をスレーブとし、無線 LAN ルータを通じた TCP/IP 通信によって動作指令や状態を通信し合うことで協調動作を実現した (Fig. 4.5)。

各マシンにおいて、①動作開始待ち、②ブロック動作中、③ブロック動作完了、④原点復帰開始待ち、⑤原点復帰中、⑥原点復帰完了、これらの6つの状態を持ち、マスタによる管理のもとで各マシンが状態遷移を繰り返す。なお動作開始時にはサイドマシン→ミドルマシン、原点復帰においてはミドルマシン→サイドマシンの順で指令を送っており、これにより通信遅延やパケットロスが生じた場合においてもマ

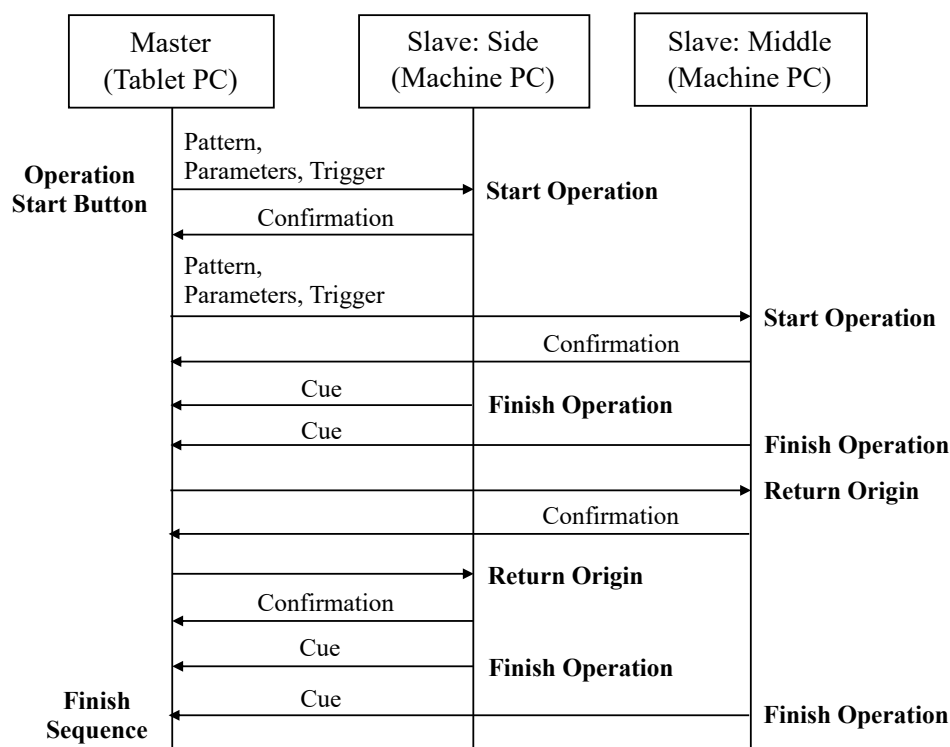


Fig. 4.5: マスタスレーブによるマシン間協調動作

シン間が衝突することなく制御を行える。各通信路における通信遅延の計測結果は、平均 1ms 以下であった。

4.1.6 アプリケーションソフトウェア

サイド攻撃に着目した事前ブロック形態指定による制御手法として、練習現場のコーチなどが操作可能な GUI アプリケーションを開発した (Fig. 4.6)。様々なブロック形態を提示するための GUI として、事前に 12 つのパターンに対応させた。使用したタブレット PC は、練習現場において阻害しないよう小型のタブレット PC (Lenovo 社製, ThinkPad 10, 画素数 1920 x 1200, 約 600 g, 本体寸法約 256 x 177 x 9.1 mm) を用いた。

本プログラムの起動画面では、レフト、ライトそれぞれにおいて 2nd Tempo が 4 パターン、3rd Tempo が 2 パターンの計 12 パターンからブロック形態の選択が可能である。2nd Tempo はサイド攻撃の中でも平行トスなどの早いトスのアタックを、3rd Tempo は 2 段トスなどの山なりで時間を要するアタックを指す。2nd Tempo の詳細は、

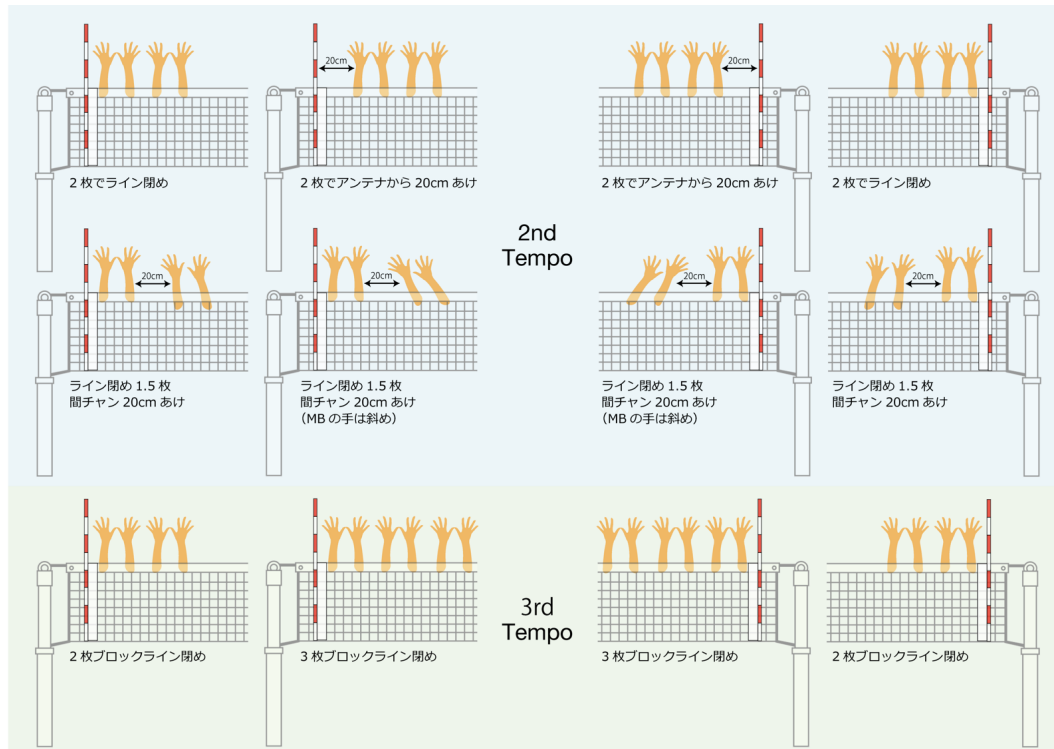


Fig. 4.6: システム操作 GUI アプリケーション

①2枚ブロックでアンテナとの隙間無し，②2枚ブロックでクロス閉め，③1.5枚でブロック間の距離 20 cm，④1.5枚でブロック間の距離 20 cm かつミドルの腕が斜め，以上の4パターンであり，3rd Tempoの詳細は，①2枚ブロックでアンテナとの隙間無し，②3枚ブロックでアンテナとの隙間無し，以上の2パターンである。

操作者はこの12パターン内から練習内で使用するブロック形態の選択を行う。パターンをタップ操作により選択すると，別のウィンドウが出現する (Fig. 4.7)。このウィンドウではブロッカー毎のブロック位置の微調整 (1 cm 毎, 最大 20 cm まで) をフリック動作によって可能とした。またブロックのタイミングの微調整 (0.1 sec 毎, 1.1-3.0 sec) も可能とした。変更したパラメータはリアルタイムで各マシンへ送られる。その後「動作開始ボタン」 (Fig. 4.7 内, 右側の緑ボタン) の押下により，その時刻からマシン2体，あるいは3体が自動でブロック動作を開始する，ブロック動作中は動作開始ボタンを非表示とすることで，誤操作を防止する。4.1.5 項で説明した状態遷移がタブレット PC 内バックグラウンドで制御が行われ，再び動作開始待ちとなると「動作開始ボタン」を出現させる。これにより操作者に次の動作開始可能なタイミングを提示することができる。なお「動作開始ボタン」の表示が大きくデザインさ



Fig. 4.7: ブロック形態指定後ウィンドウ (左：レフト側，右：ライト側)

れていること，および画面右端に配置されている理由として，タブレット PC を注視することなくセッターのトスのタイミングで動作を開始させることができるよう，現場のコーチの意見を採用して実装した。

4.1.7 セットアップの容易化

トレーニングシステムとして実際の練習現場で使用してもらうためには，練習の流れの中で速やかに設置，運用，撤去を行える必要がある．そこでセットアップの自動化を取り入れた．練習開始前に操作者にはシステム電源とタブレット PC の起動のみの操作とし，システムの起動およびキャリブレーションを自動化した．以下で自動起動の流れを説明する．

1. システム電源の起動により AC 電源が各マシンに供給される．電源突入により各マシン搭載 PC とサーボアンプが起動する．
2. 各マシン搭載 PC が起動した後，制御用プログラムが起動しマスタ (タブレット PC) との通信接続待ちとなる．タブレット PC を起動により各マシン搭載 PC とタブレット PC が接続され，マスタスレーブによる制御が可能となる．
3. 全ての PC の接続が完了すると，マシン 3 体が自動でキャリブレーションを行う．各動作軸のエンコーダはインクリメント型であるため，モータ起動時に絶対位置を取得する必要がある．各軸用のセンサを用いてキャリブレーションを行い，全ての軸が完了した後，タブレット PC からの操作が可能となる．

4.1.8 実運用への対応

2 枚ブロックでアンテナとの隙間無しのブロック動作において、ミドルマシンの初期位置(レール中央)から所定の位置までの移動動作(約 3.8 m)に最高速度でも 1.5 秒以上の時間を要する。一方で、練習現場からのシステム要求として、動作開始から最短で 1.1 秒でブロック形態を提示することであった。そこでミドルマシンの動作開始前に初期移動(1.2 m)を追加することで要求に対処した(Fig. 4.8)。Fig. 4.6 に示した画面から Fig. 4.7 に示したウィンドウへの推移において、レフト側のパターン選択時はレフト側へ、ライト側のパターン選択時はライト側へ約 1.2 m 移動させる。これにより動作開始ボタンを押下した時刻から、指定されたブロック完成時間までにブロック形態を提示可能とした。なお Fig. 4.7 に示したウィンドウを閉じる時にミドルマシンを初期位置(レール中央)に戻るようにし、次の動作へと繋がるようにした。

4.1.9 実運用による評価

全日本女子バレーボールチームが練習を行う拠点である、味の素ナショナルトレーニングセンター(NTC: National Training Center)へブロックマシン 1 号機を導入し、2015 年 8 月中の合宿練習期間中におけるアタック練習内で 2 日間使用された(Fig. 4.9)。1 日目は約 30 分の練習時間内に計 76 回、2 日目は約 25 分間の練習時間内に計 112 回使用され、2 日間で計 188 回、計 7 名の選手が参加した。2nd Tempo と 3rd Tempo の内訳を Table 4.1 に示す。1 日目の 2nd Tempo はレフト 21 回、ライト 21 回、3rd Tempo はレフト 19 回、ライト 15 回、2 日目は 2nd Tempo はレフト 82 回、ライト 30 回の使用回数であった。1 日目の 3rd Tempo での使用中、システムの稼働が停止する問題が発生したため、2 日目は 2nd Tempo のみの使用となった。タブレット PC の操作者であ

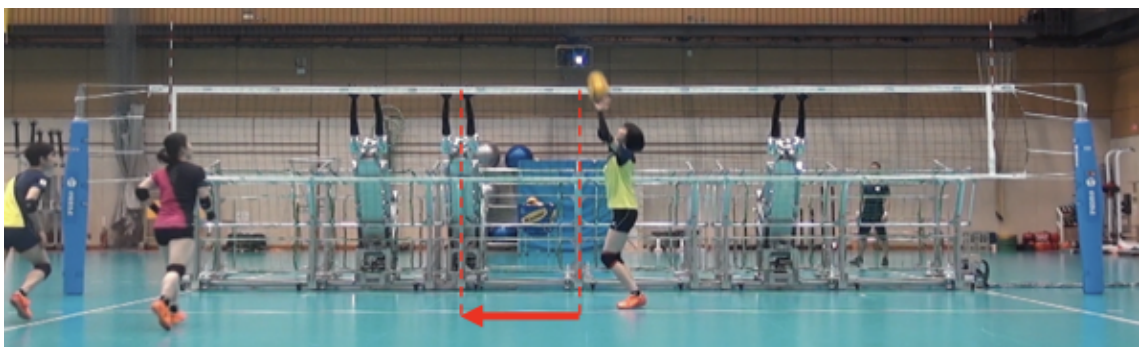


Fig. 4.8: ミドルマシンの初期移動



Fig. 4.9: 実際の練習現場におけるブロックマシン1号機の運用 (左：レフト1.5枚, 中：レフト2枚, 右：レフト3枚)

Table 4.1: ブロックマシン1号機の使用回数

Num. of uses	1st day (30 min.)		2nd day (25 min.)	
	Left side	Right side	Left side	Right side
2nd Tempo	21	21	82	30
3rd Tempo	19	15	-	-

るコーチは、ブロック提示パターンおよびマシンブロック位置を逐次変更し、アタッカーにブロックマシンの動きを読まれないよう工夫して練習を行っていた。

4.1.10 結果と考察

実際の練習現場における運用を通じた、2日間の使用におけるアタック結果を観測した。アタック結果として以下の4パターンに分類した (Fig. 4.10)。

- (1) イン：アタック後のボールがブロックを抜けて相手コート内に落球
- (2) ワンタッチアウト：アタック後のボールがブロッカーの腕や手指に当たり、コート外で落球
- (3) シャットアウト：アタック後のボールがブロッカーの腕や手指に当たり、自陣コート内で落球
- (4) アウト：アタック後のボールがブロックから逸れてコート外で落球

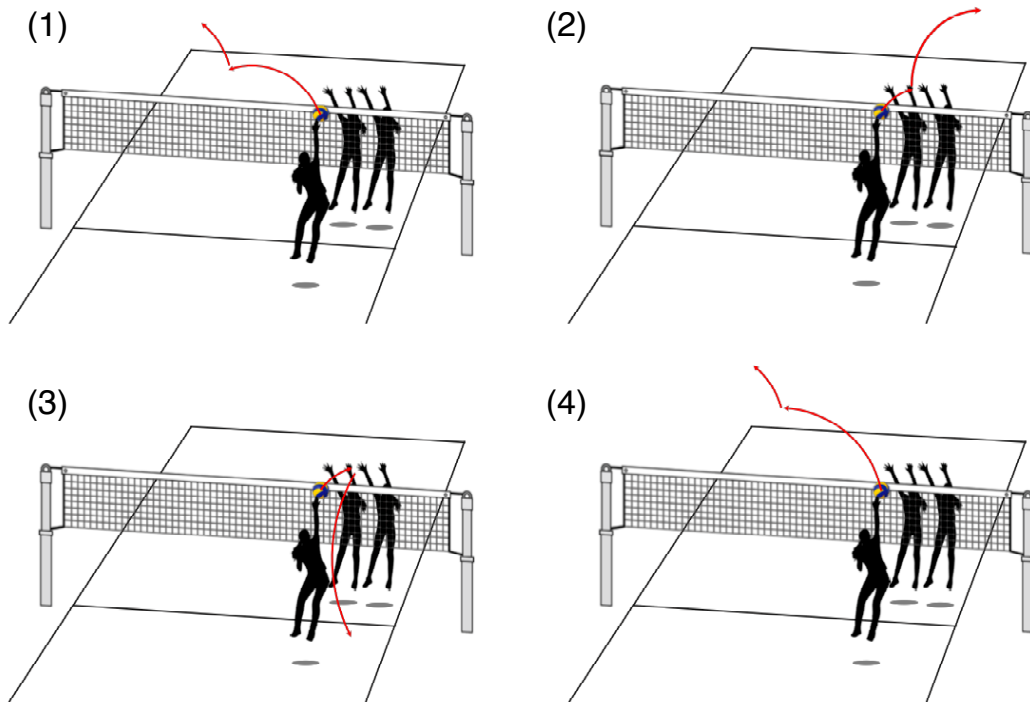


Fig. 4.10: アタック結果の分類 ((1) イン, (2) ワンタッチアウト, (3) シャットアウト, (4) アウト)

これらの結果から, (1) イン, (2) ワンタッチアウトはアタッカー側の得点, (3) シャットアウト, (4) アウトはブロッカー側の得点であると考えられる. 1日目と2日目の結果を合算し, 2nd Tempo と 3rd Tempo に分けてそれぞれのアタック結果の割合を Fig. 4.11 に示す.

Fig. 4.11 の 2nd Tempo のグラフから, アタック決定率が6割程度であることがわかる. アタック決定率はアタックの総打数に対する得点数の割合であり, 一般的な試合中におけるアタック決定率と比較すると6割は高い数値となる. しかし今回のブロックマシンを使用したアタック練習において, 相手コート側にレシーバ選手が配置されていなかったため, 相手コート内に落球する確率が高いことが起因していると考えられる. 一方で (2)-(4) の割合で約半数を占めていることから, アタックコースに対してブロック形態を提示し, アタッカーにブロックの存在を意識させる有効な存在となっていたと考えられる.

Fig. 4.11 の 3rd Tempo のグラフから, (1) の割合が1割以下と非常に低く, アタッカーに対してブロック形態の提示が非常に有効な存在となっていたことがわかる. また (2), (4) の割合が2nd Tempo と比較して大きく増加していることから, アタッカーが

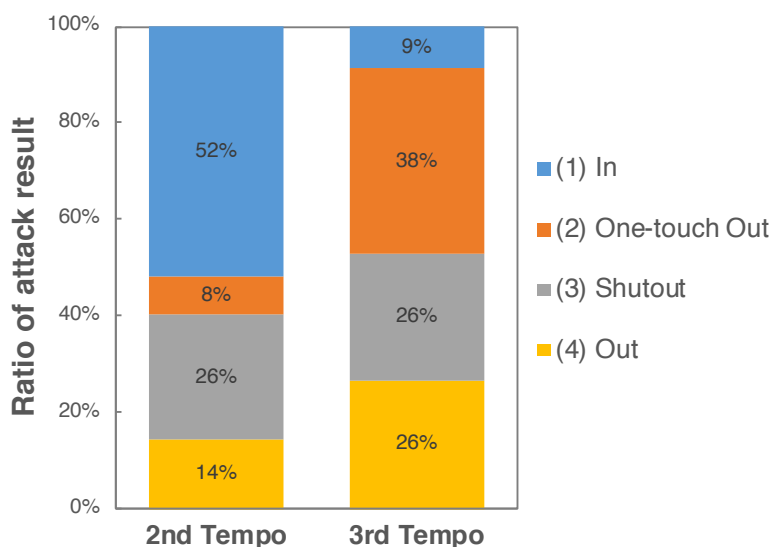


Fig. 4.11: 2nd Tempo と 3rd Tempo 毎のアタック結果の割合

意識してブロッカーを避けて、あるいはワンタッチを狙ってアタックを打っていたと考えられる。3rd Tempo は通常、レセプションやディグが崩れてトスが山なりで軌道が高くなり、アタックまでの時間が長いためにブロッカーが3枚で構成される。よってアタックコースが限定されるために、アタッカーは意識的にワンタッチを狙っているように見受けられた。またコーチらも選手に対して、ワンタッチを狙うよう指示をしているシーンが何度か見られた。

世界ランキング上位国のチームのように、高いブロッカーにコースを限定された場合、ワンタッチで得点をすることは非常に有効とされており、そのようなシチュエーションをブロックマシンが再現できたといえ、有益なトレーニングシステムであったといえる。

一方で練習中に改善点も表出した、マシンによるブロック動作は、トスが上がる前に事前に設定した位置においてブロック形態を提示するため、短いトスが上がった時にアタッカー位置とブロック位置に誤差が生じ、アタック練習の効果が低減してしまう (Fig. 4.12)。本問題に関する解決策に関しては5章以降に述べる。

4.1.11 選手・コーチからのフィードバック

2日間の運用を通じて、ブロックマシンに対してアタック練習を行った選手、およびコーチから、フィードバックとして以下の意見があがった。



Fig. 4.12: 短くなったトスにおけるアタック-ブロック位置誤差

- (a) ブロックの形が1回ずつ変わることによって、実際のブロックに近い形でのアタック練習ができた点良かった
- (b) 1回ごとにマシン同士の幅が違ったり、ボールとの間を閉められたりと状況が変わっていたので、ブロックを見るいい練習になった
- (c) ロシア、ブラジルなど、高さのある国のブロックが再現されている(同じ感じで手が出てくる)
- (d) 指先のワンタッチを狙う練習になる
- (e) 練習に男性パートナーがいない時に非常に有効であると感じた
- (f) 相手がマシンのため、遠慮せず思い切り打つことができた
- (g) トスが短い時の位置調整ができていない
- (h) クイック練習にも対応できるようになると、今後システム使用の幅が広がる
- (i) オフセット移動があることで練習メニューに制約が生じる
- (j) マシン1体ずつの細かなパラメータ(両腕の角度や前傾角度など)も任意に変更できるとよい
- (k) 指先が硬すぎて人間の指に当たった時とは違う跳ね返し方をする

(a) から (f) はポジティブな意見，(g) から (i) はネガティブな意見，(j) から (k) は今後の要望として捉えることができる．(a) から (e) の意見から，本システムが実際のアタック練習において十分有益なトレーニング用具として活用されたと言える．

(f) の意見は筆者の予想外の意見であった．なぜなら選手がこの意見とは逆の心理状態となることを危惧したためである．高速に動作し，大きな騒音とともに選手に向かってくるマシン(機械)に対して恐れてしまい[53]，通常通りにアタックをすることができるか，あるいは最悪の場合，選手のアタックフォームや心的負荷に影響を与えてしまうリスクを懸念していた．しかし実際には，ブロッカーが人間ではなくマシンであることがプラスの方向に働きかけることとなった．

(h), (i), (j) の意見に関しては4.2節で，(g) の意見に関しては5章で述べる．

4.1.12 ブロックマシン1号機のまとめ

本項ではブロックマシン1号機について説明し，実際の練習現場の要求を満たすシステムデザインを行い，システム開発，評価を通じてその有効性を明らかにした．特にトップアスリートのブロック動作を再現するマシンおよびシステムを開発し，実際の練習現場における実運用を通じて効果を示した．ミドルマシンの横移動速度不足による動きの制限があるものの，運動スキルのオープンスキルをトレーニングするインタラクティブなシステムとして，相手コート要因であるブロック形態の変化に対応するための技術向上に貢献することが示唆された．

一方で2日間の実際の練習現場における運用を通じて，問題点や改善点が表出したため，より効率的に，そして練習内容を充実させるトレーニングシステムとして，4.2節でブロックマシン1号機の改良機であるブロックマシン2号機について説明する．

4.2 ブロックマシン 2 号機

ブロックマシン 1 号機のシステム開発を通じて生じた問題点，運用により明らかとなった改良点を解決するため，ブロックマシン 2 号機を開発した．特にマシン動作速度の向上，システム可用性の向上，GUI 操作自由度の向上に焦点を当てた．以下，ブロックマシン 2 号機のシステム設計，構築，評価，選手への影響を以下に述べる．

4.2.1 設計指針

マシン動作速度向上に関して，練習現場における要求を満たすために各マシンの所定位置から，様々なブロック形態を 1.1 秒で完成するシステムを構築する必要がある．最も時間の要する動作はマシンの横移動動作であり，その最大移動距離は約 3.8 m である．そこでモータの変更，システム構成の変更，マシンの軽量化を行なった．

システム可用性に関して，実際の運用現場におけるシステム運用を安定させる必要がある．ブロックマシン 1 号機では，機構強度の不備や AC 電源の不安定性，ネットワークの不安定性による問題が表出した．そこでシステム構成の変更，マシンの機構の変更を行う．

GUI 操作自由度の向上に関して，現場の様々な練習メニューに対応可能とするアプリケーションや，サイド攻撃だけでなくクイック攻撃やバックアタック攻撃にも対応可能とする GUI を提案する必要がある．

4.2.2 システム全体の構成

ブロックマシン 2 号機のシステム全体外観を Fig. 4.13 に示し，システム構成図を Fig. 4.14 に示す．基本的なシステム構成は 1 号機と同様であるが，大きな変更点としてブロックマシン 1 号機では各マシン内で PC からモータ制御回路基板，サーボアンプ，モータまで完結する構成としていたが，ブロックマシン 2 号機ではレール横に制御盤を配置し，内部にマシン 3 体分のサーボアンプを搭載した．これに伴い，制御盤から各マシンへケーブルを配線する必要があるため，ケーブルベアによる配線を採用した．これにより以下の 3 点でメリットがある．

- (1) マシンに搭載するモータ軸数分のモータアンプの重量を軽量化可能である
- (2) ブロックマシン 1 号機の電源供給手法での AC 電源の不安定性を排除可能である．
- (3) PC1 台でシステム全体の管理が可能となり制御が容易になる．また無線通信路の減少によりシステム全体の通信速度が向上するとともに，安定性が向上する．

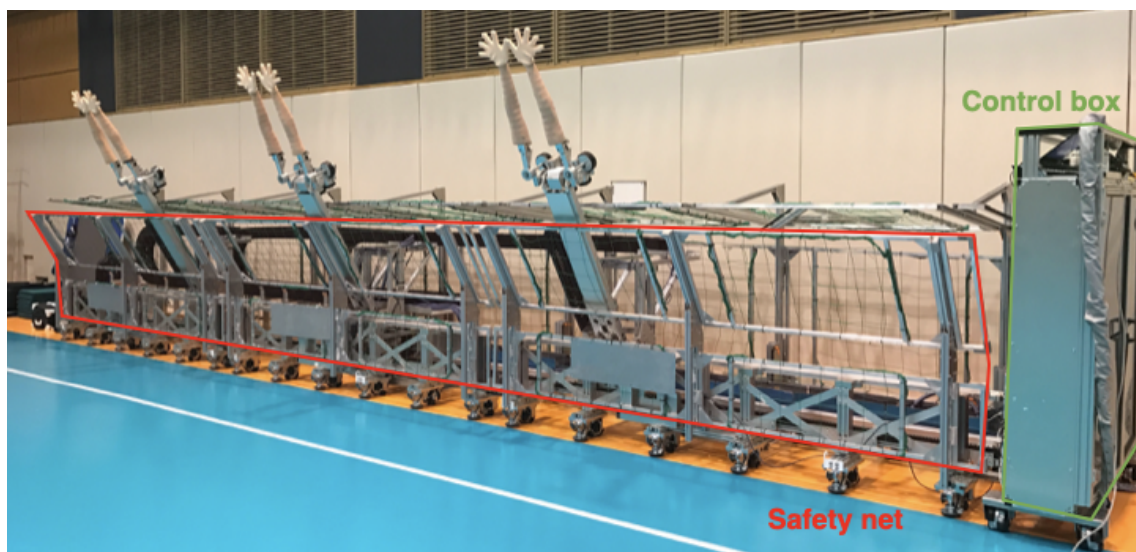


Fig. 4.13: ブロックマシン 2 号機のシステム全体外観

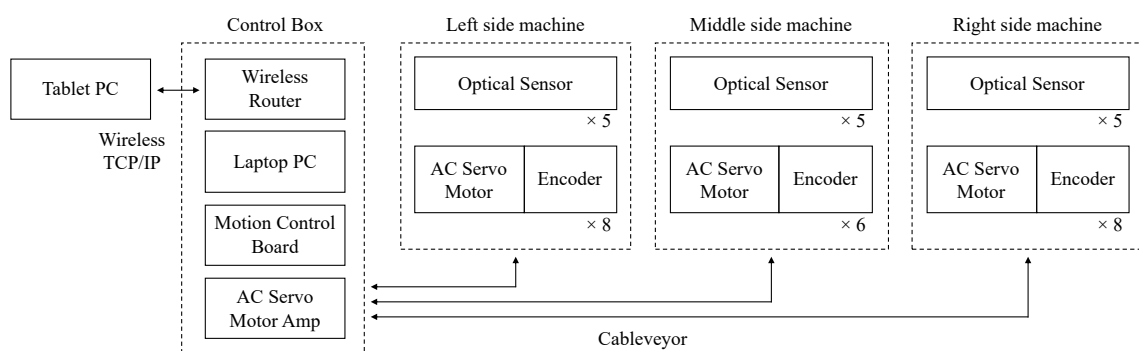


Fig. 4.14: ブロックマシン 2 号機のシステム構成図

ブロックマシン 1 号機と同様，ブロッカーを再現するマシン 3 体，マシンが走行を行うためのレール，コーチやスタッフがシステムを操作するために用いるタブレット PC から構成される．レール幅はマシンが 9 m の走行を行える可動域とし，システム全体として横幅は制御盤 (図中緑枠) が加わり (約 300 mm) 約 9,400 mm，奥行幅は変わらず 1,200 mm の設置寸法である．また同様に防球ネット (図中赤枠) も設置した．システム制御用 PC とタブレット PC との通信は無線 LAN ルータを介して TCP/IP 通信によって無線通信を行う．

4.2.3 マシン単体のハードウェア構成

マシン単体の外観を Fig. 4.15 に示し，構成要素とその機構について説明する．各マシンの自由度はブロックマシン 1 号機と同様，左右横移動動作，ジャンプ動作，前傾動作，左右各腕内外転動作の 5 自由度を有する．各自由度を駆動するモータはミドルマシンの左右横移動動作のみ容量の大きな AC サーボモータ (Keyence 社製, 三相 200 V, 5 kW) を，それ以外は 1 号機と同等のモータ (Panasonic 社製, 100 V, 400 W) を用いた．詳細な機構を以下に述べるとともに，使用モータなどに関しては Table 4.2 に示す．

左右横移動動作はブロックマシン 1 号機と同様にラックアンドピニオン機構を採用した．レール側にラックギアを，マシン側にピニオンギアを配置する構成とした (Fig.

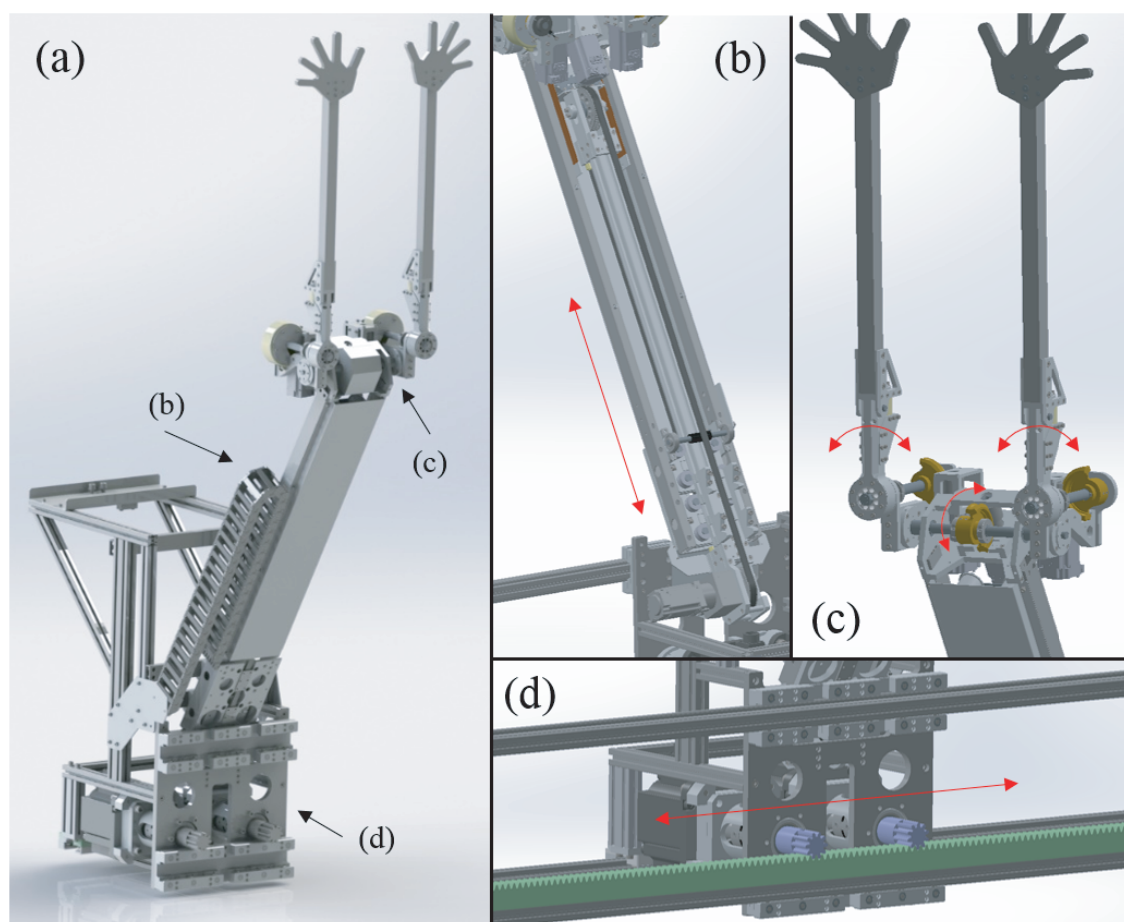


Fig. 4.15: マシンの機構詳細 ((a) 外観, (b) ジャンプ機構, (c) 前傾機構と腕内外転機構, (d) 移動機構)

Table 4.2: ブロックマシン2号機の各機構におけるモータ, 減速比

	Mechanism	Motor	Reduction ratio
Lateral motion (Middle)	Rack-and-pinion, PD $\phi 40$ mm	5 kW \times 2	-
Lateral motion (Side)	Rack-and-pinion, PD $\phi 60$ mm	400 W \times 4	4
Jumping	Timing belt, pulley, D $\phi 100$ mm	400 W	4
Tilting	Worm gear, worm wheel	400 W	40
Arm	Worm gear, worm wheel	400 W	40

4.15(d)). システム要求を満たすために, ミドルマシンのみ高い横移動速度が求められるため, ミドルマシンとサイドマシンで左右横移動動作の構成が異なる. ミドルマシンは三相 200 V による AC サーボモータを 2 軸用いて, 計 10 kW での駆動を行う. ピッチ円直径 $\phi 40$ mm, モジュール 4, 並歯のピニオンギアを用いた. サイドマシンは単相 100 V による AC サーボモータを 4 軸用いて, 計 1.6 kW での駆動を行う. ピッチ円直径 $\phi 60$ mm, モジュール 4, 並歯のピニオンギアを用いた. なお, 減速比 4 のギアヘッドを取り付けた.

ジャンプ動作はタイミングベルトとプーリーを用いた機構を採用した (Fig. 4.15(b)). スライダ部を 600 mm の可動域で上下させることで, ブロッカーのジャンプ動作を再現する. プーリーの直径は $\phi 100$ mm, 減速比 4 のギアヘッドを用いた. また, 動作時の重力補償としてスライダ上部から定荷重ばねを用いた.

前傾動作はウォームギア, ウォームホイールを用いた機構を採用した. 直立 0 deg から前方 30 deg の可動域で前傾させることでブロッカーの腕が倒れこむ動作を再現する (Fig. 4.15(c)). ウォームギアの歯数 40, モジュール 2, 減速比 40 であった. 前傾動作においてウォームギアを用いることで, アタックされたボールが腕部に当たるときの外力による姿勢の変化を防ぐ.

左右内外転動作は前傾動作と同様, ウォームギア, ウォームホイールを用いた機構を採用した. 直立 0 deg から左右へそれぞれ 30 deg の可動域で内外転動作を再現する (Fig. 4.15(c)). ウォームギアの仕様は前傾動作と同様であり, 同じく外力による姿勢の変化を防ぐ構成とした.

マシン単体の質量はモータ等を含めて約 80 kg であった. 各マシンと制御盤間はモータ, エンコーダ, センサ系ケーブルの配線が必要となるため, ケーブルベアにより配線した. これにより, 左右横移動動作時にケーブルベアの走行抵抗も合わせて負荷としてかかる.

また練習現場から腕部、手指部の視認性に関する改善要求があったため、ブロックマシン2号機で改善を行った。ブロックマシン1号機の腕部、手指部は黒色のゴム、およびポリカーボネート素材であったが、実際のブロッカーと比較すると、ブロックマシンのブロック形態は知覚しやすい、という選手からの意見があった。そこで腕部には肌色のテーピングを巻き、手指部には肌色の手袋を二重に重ねて取り付けることで視認性を人間と同等となるようにした。

ブロックマシン2号機では、特にミドルマシンにおいて、高速な横移動動作に伴う急加速、急停止を短い時間間隔で連続的に数百回と繰り返す。そのため、特に急停止においてモータにかかる負荷が大きく、故障の原因となってしまう。そこでミドルマシンのモータアンプには1軸につき約2 kWの回生抵抗を取り付け、停止する区間の運動エネルギーをサーボアンプを通じて回生抵抗へ逃す構成とした。

4.2.4 システム制御手法

ブロックマシン2号機においても、ブロックマシン1号機と同様のシステム制御手法を採用した。事前にブロック形態をタブレットPCを用いて操作、指定することで各マシンの動作軌跡をプリセットし、セッターのトスのタイミングで動作開始トリガーをタブレットPCから送ることで、その後の各マシンは自動で動作する方式とした。詳細は4.1.4項、および4.1.5項を参照されたい。

各マシンの初期位置、姿勢はFig. 4.13の通り、ミドルマシンはレール中央、両サイドのマシンは中央から約2,000 mmの位置とした。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。またジャンプ動作は最下点、前傾動作は前方30 deg、左右各腕内外転動作は0 degを初期姿勢とした。

4.2.5 GUIアプリケーションソフトウェア

4.1.4項で説明した通り、攻撃側の視点でアタックをみると大きく3つのパターンに分けることができ、サイド攻撃、バックアタック攻撃、クイック攻撃の2種類である。本システムではこれらの攻撃手法に対応するブロック形態を提示することが求められるが、ブロックマシン1号機におけるGUIアプリケーションはサイド攻撃に対応する機能のみであった。そのため練習現場からの改善要求として、バックアタック攻撃やクイック攻撃にも対応可能な機能の追加があがった。またサイド攻撃に関しても、パラメータをより詳細に変更可能とする機能追加の改善要求があがった。そこでブロックマシン2号機におけるGUIアプリケーションに関して以下に説明する。

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) クイック攻撃，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，あるいはワンタッチアウト（ブロッカーの腕に当てて外に出す得点）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，レフト，ライトの各方向計10パターンのブロック形態を保存する (Fig. 4.16)．練習中においては目的となるブロック形態をこの10パターンの中から選択する．パターン選択後も上記パラメータの変更が可能であり (Fig. 4.17)，変更内容を保存あるいは破棄する（はじめに選んだ状態に戻す）ことも可能である．なお練習終了後に本プログラムを終了する際，上記パラメータはタブレットPC内に保存され，次回プログラム起動時に呼び出される．

Fig. 4.16におけるパターン選択後に開かれる Fig. 4.17における機能に関して説明する．各ブロッカーのイラストの頭部領域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を0-600 mmの範囲で10 mmの解像度で変更できる．最終ブロック位置はアンテナ-マシン間距離で0-1.5 m(10パターンのうち2パターンは汎用性向上のために3.0 mまで可能)の範囲で10 mmの解像度で変更できる．タブレットPC操作者は，ウィンドウに表示されたアンテナ-マシン間距離やマシン-マシン間距離を確認しながら操作が可能である．また各腕領域を左右にドラッグすることで各腕の角度を ± 30 degの範囲で5 degの解像度で変更できる．GUIプログラム上で各マシン間や各腕が干渉・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．またブロック形態の完成タイミングに関しては，タブレットPC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，セッターやアタッカーの位置，トスの種類に応じて様々なコート位置からアタックが行われる．そのため(1)の詳細なブロック形態と比較すると，アタック位置に応じてブロック位置の瞬間的な判断での正確性が求められる．そこで(2)においては，ブロック位置を瞬時に指定可能なインターフェースとした．(Fig. 4.18)．アタック位置に応じてタブレット上でのネット

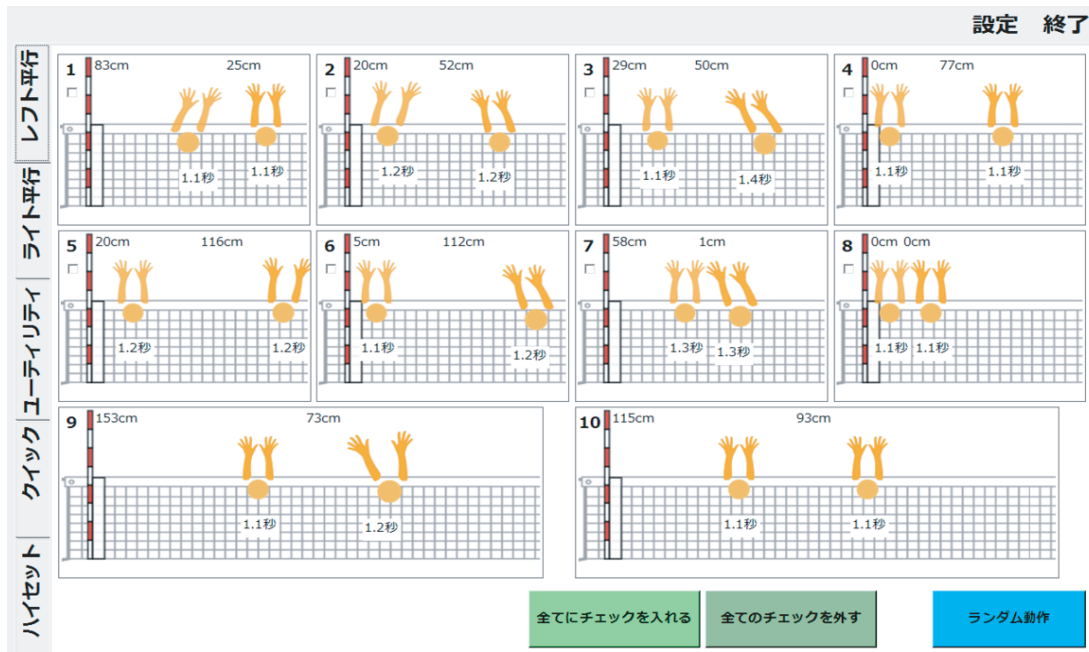


Fig. 4.16: サイド攻撃に対応した機能 (表示はレフト側)

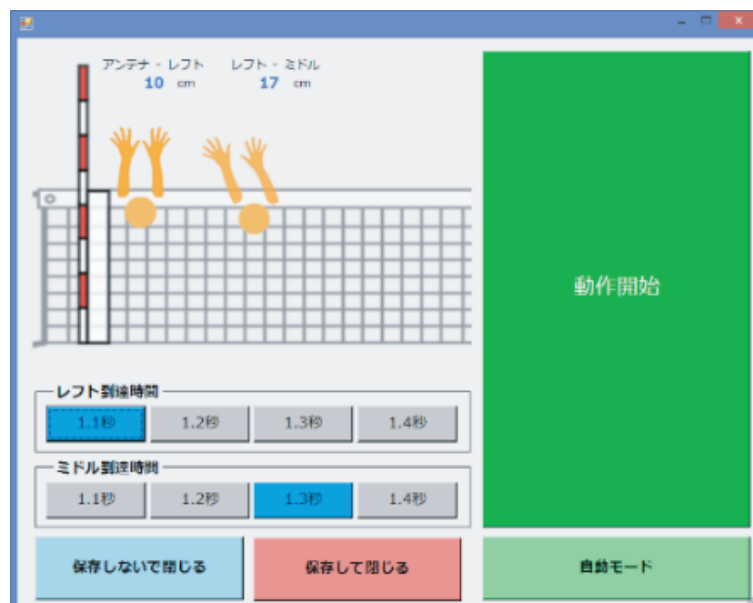


Fig. 4.17: Fig. 4.16 でのパターン選択後のパラメータ詳細変更機能

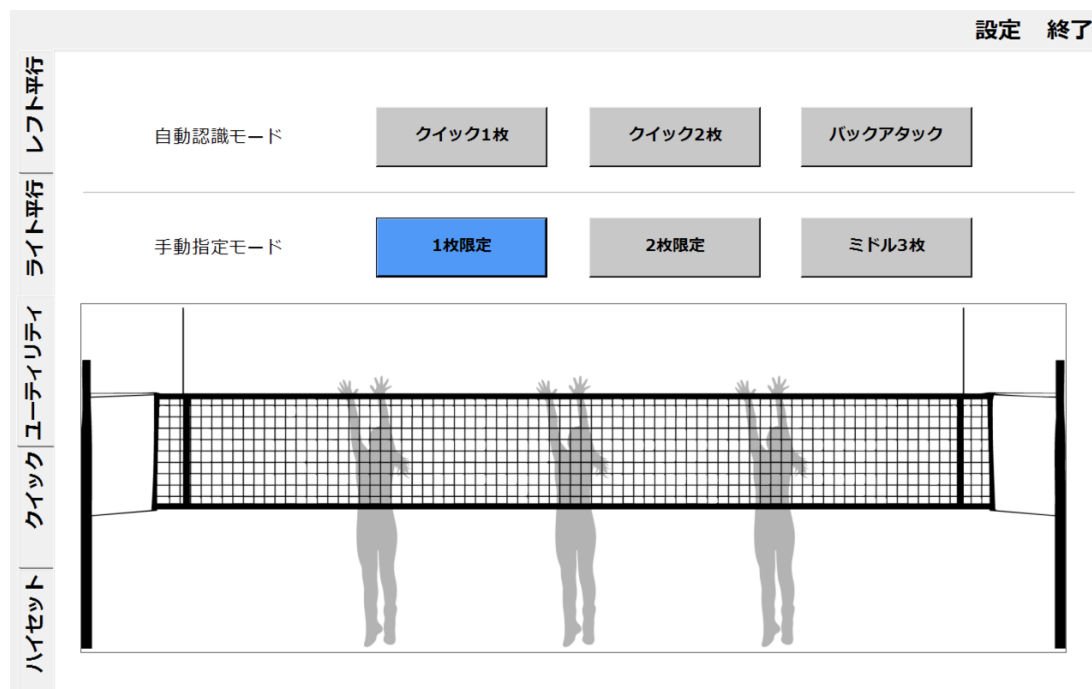


Fig. 4.18: クイック攻撃，バックアタック攻撃に対応した機能

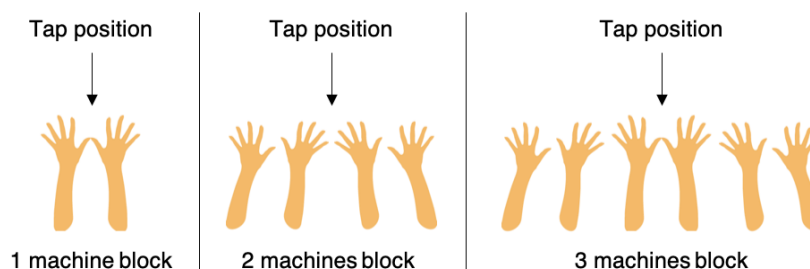


Fig. 4.19: ブロック枚数指定毎のブロック形態の提示の概念図

描画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 PC をタップしてから約 500 ms 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 (Fig. 4.19). ブロック枚数指定が 1 枚の時は最も近いマシン 1 体がタップ位置に対してブロック目標位置とし，2 枚の時は最も近いマシン 2 体がタップ位置に対して挟み込むようなブロック形態とし，3 枚の時はタップ位置に対してミドルマシンは中央に，サイドマシンはそれぞれ挟み込むようなブロック形態とした．

4.2.6 動作性能評価

ブロックマシンはオープンスキルをトレーニングするためのシステムであり、各マシンが世界トップ選手と同等のブロック形態の提示可能性を有している必要がある。世界トップ選手の動作を再現できることは、動作提示の手法や動作速度、パラメータ等の調整により様々なスキルレベルに対して効果的なトレーニングが行えることを示せる。

そこでまずはじめに、ブロック動作における横移動速度の検証を行った。アメリカのナショナルリーグ上位のクラブチームに所属する18-22歳の女性を対象とした実験によると、ネット中央でブロック動作を行った後、3 mの横移動動作を行うためにかかる時間は1.1秒であったと報告されている[54]。一方でブロックマシン2号機のミドルマシンの横移動動作は、1.1秒の時間で3.7 m(ミドルマシンの最大可動範囲)移動可能である。したがって横移動動作に関して十分な速度を有しているといえる。

次に世界トップ選手の試合中におけるブロック動作を解析し、マシンの動作との比較を行った。2013年に開催された国際大会であるワールドグランドチャンピオンズカップにおけるブラジル対ドミニカ戦とした。当時ブラジルはFIVB世界ランキングで1位に位置していたチームである。対象試合をエンドライン後方2視点から撮影を行い、その映像を用いて実際のブロック動作の解析を行った。2視点映像による3次元位置推定に関しては、3.1.1項を参照されたい。コート座標系はFig. 3.2で示した通りである。サイド攻撃におけるミドルブロッカーの頭部位置推移を推定するため、セッターのトス動作からブロック後の着地までの映像を各フレーム毎に分割し、2視点画像それぞれにおいてミドルブロッカーの頭部位置を手動により画像座標を取得し、3.1.1項で説明した手法により3次元位置を推定した。

試合映像から任意に抽出した4つのブロックシーンにおけるミドルブロッカーの頭部位置軌跡をFig. 4.20に示す。横軸がコート座標系のX軸、縦軸がY軸を示している。ネット中央付近でトス動作が行われ、その後頭部の沈み込み動作とともにレフトあるいはライト方向へ移動動作を行い、ジャンプ動作とともにブロックを行なっていることがわかる。各軌跡の終点がブロック後の着地点における頭部位置である。各4シーンにおいて、トスが行われた時刻におけるブロッカー位置(Fig. 4.20における丸点)を基準とした時の時間経過に対する移動距離の変化をFig. 4.21に示す。(a)-(d)の各シーンにおいて、ミドルブロッカーの移動距離をミドルマシンの横移動動作における目標距離としたときの動作の比較を示している。4つの全てのシーンにおいて、ミドルマシンは目標位置に対してミドルブロッカーよりも早く到達していることがわかる。またアタックのタイミングにおいても同様のことがいえるため、世界トップ選手以上の横移動動作が提示可能であるといえる。ただ(b)のシーンに関して、加速区間(0-400 ms)において一部ミドルブロッカーの方が早く動作をしていることがわかる。

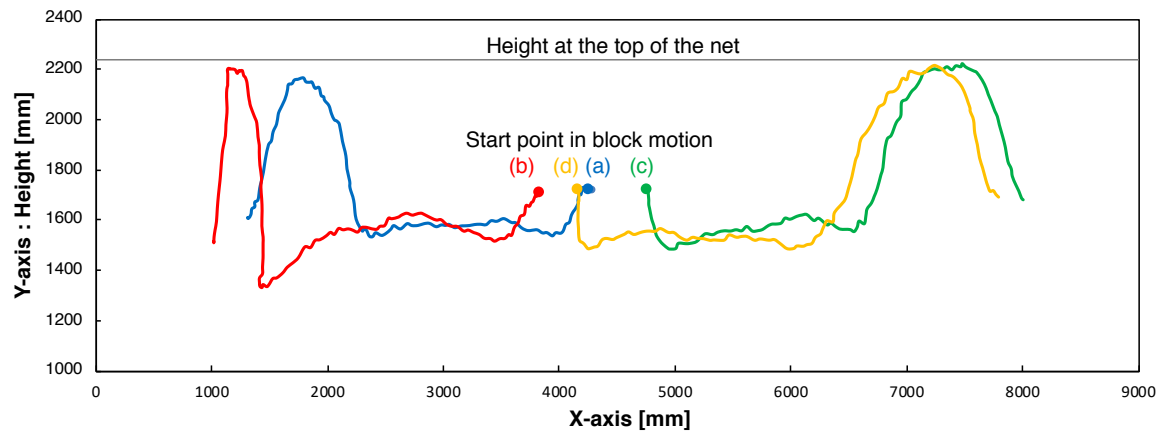


Fig. 4.20: ミドルブロッカーのブロック動作における頭部軌跡

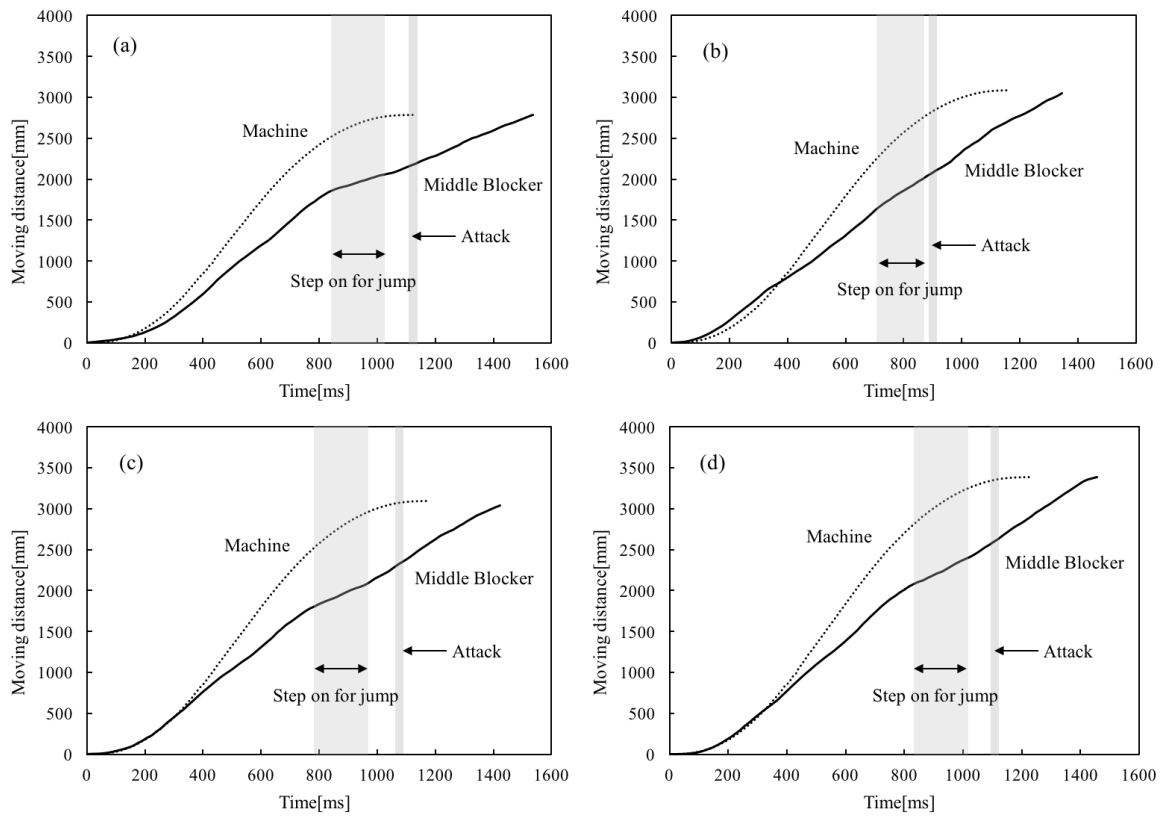


Fig. 4.21: ミドルブロッカーとミドルマシンの横移動動作の時間推移比較

一見、加速性能ではミドルマシンの方が劣っているように観測されるが、本検証における選手位置を頭部位置としているため、加速区間において身体を移動方向に傾けながら移動する動作は重心移動と頭部移動による位置推移が合わさっていることに起因すると考えられる。そのため、実際の選手の重心移動と比較すると同等程度、あるいはミドルマシンの方が加速性能に関しても優れていると考えられる。

最後に、実際の試合映像との比較を行うことでブロック形態の提示可能性を検証した。様々なブロック形態が存在するが、完成に最も時間を要するサイド攻撃に対する2枚ブロックライン締め(ネット両端のアンテナ際のコースを遮るブロック形態)のシーンを用いた。2枚ブロックライン締めの実際のブロッカーによる動作と、同様の動作をブロックマシン2号機で提示した時の比較を Fig. 4.22 に示す。左右の画像はセッターのトスのタイミングを時刻 $t=0$ s として開始フレームを合わせた時の、同一フレーム間隔での推移を示している。概ねの動作として、実際の選手による動作とマシンによる動作が一致しているといえる。一方で、Fig. 4.22 の3番目の画像 ($t=0.8$ s) において、選手よりも先にマシンの腕部、手指部がネット上方に出現している。忠実なブロック動作の再現のためには、肩関節における内外転動作に加えて、伸展屈曲動作が行える必要があるが、ブロックマシンでは自由度を限定していることにより肩関節の伸展屈曲動作が行えず、上述した通り、ブロック形態出現のタイミングが実際よりも早くなる。現段階においては、動作速度や機構強度の向上のために自由度を限定しているが、これによるアタッカーへの影響(ブロック位置把握のための視認性の変化など)は今後検討していく必要があるといえる。

4.2.7 実運用による評価

ブロックマシン2号機はNTCへ導入を行い、2016年7月中のリオデジャネイロオリンピック直前、全日本女子合宿練習期間中におけるアタック練習内で8日間に渡って使用された(Fig. 4.23, Fig. 4.24)。Fig. 4.23 および Fig. 4.24 内、(1)はクイック攻撃(Aクイック)に対する1枚ブロック、(2)はクイック攻撃(Cクイック)に対する1枚ブロック、(3)はクイック攻撃(Bクイック)に対する2枚ブロック、(4)はバックアタック攻撃に対する3枚ブロック、(5)はサイド攻撃(レフト)に対する1.5枚ブロック、(6)はサイド攻撃(ライト)に対する1.5枚ブロックの様子を示している。(1)-(4)はFig. 4.18の機能を、(5)-(6)はFig. 4.16の機能を使用して提示されたブロック形態である。

8日間で合計1,503回の使用があり、9名の選手、3名のコーチが本システムに対してアタックを行うとともに、1名のコーチが常にタブレットPCを操作していた。なお4.2.5項で説明した、2つの機能を用いて様々な練習メニューに組み込まれた。練習内においてタブレットPCの操作者であるコーチは、ブロック提示パターンやブロッ



Fig. 4.22: 試合映像を用いたブロック形態実現可能性の検証 (サイド攻撃に対する2枚ブロック)

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。

本システムの実運用による評価のため、8日間の合宿練習期間中において計3回のヒアリング調査を選手に対して行った。マシン使用1日目、4日目、および7日目の計3回、アタッカー選手7名、セッター選手2名に対して直感的なブロックマシン2号機の感想とスキルや意識などの変化に関して口頭で答えてもらった。以下、各日と各選手のフィードバックである。

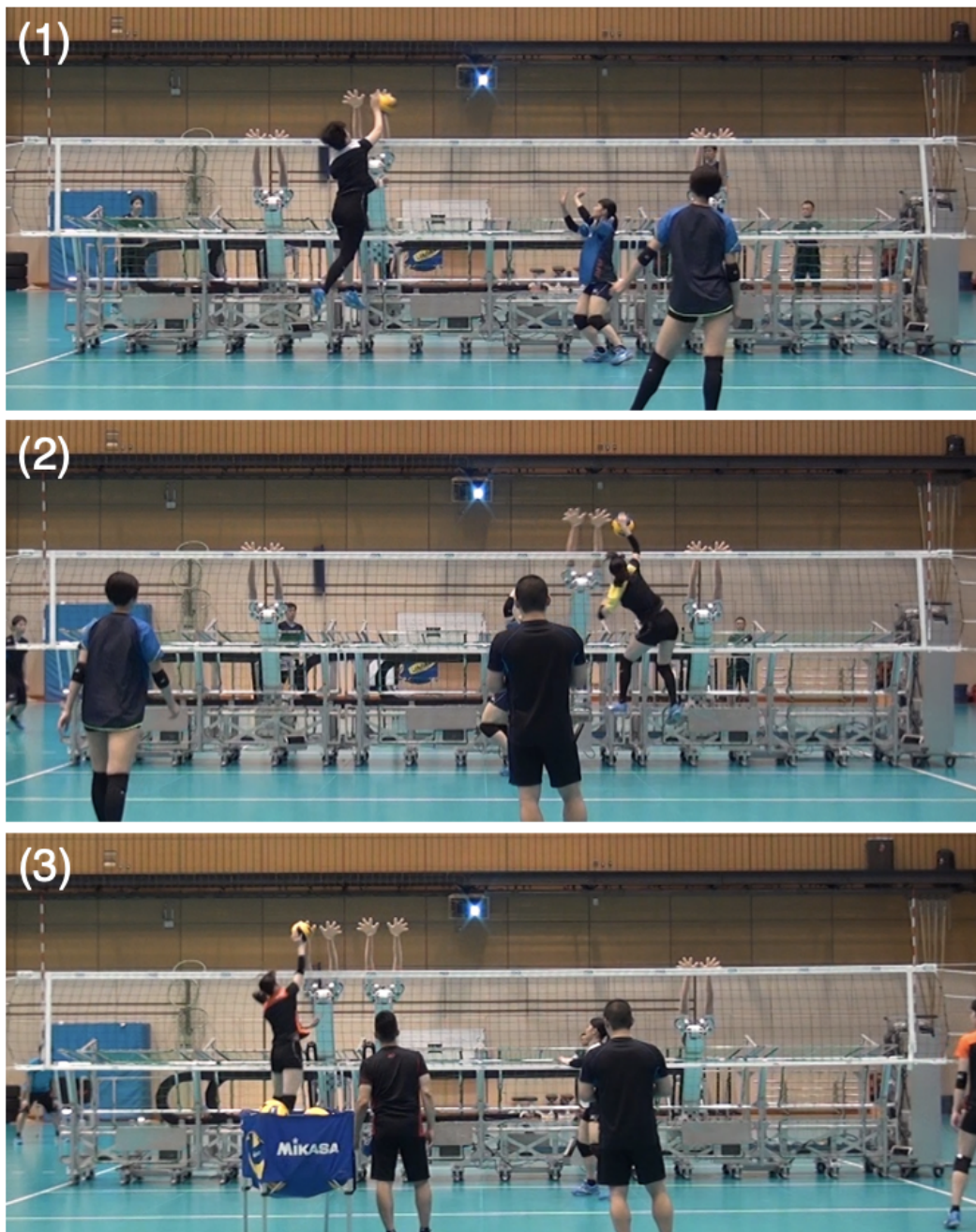


Fig. 4.23: 実際の練習現場におけるブロックマシン 2 号機使用の様子 1((1) クイック攻撃 1 枚, (2) クイック攻撃 1 枚, (3) クイック攻撃 2 枚)

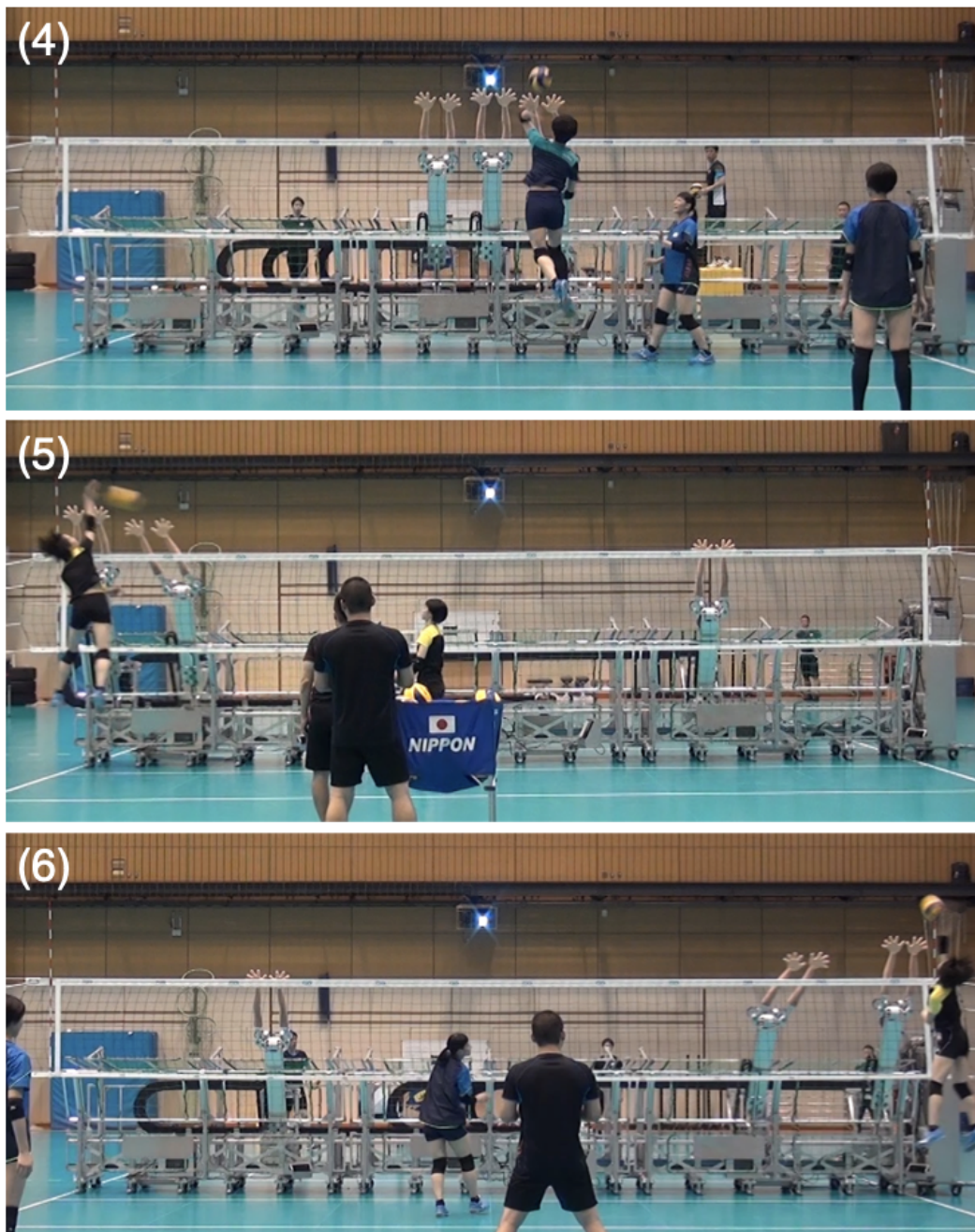


Fig. 4.24: 実際の練習現場におけるブロックマシン2号機使用の様子2((4) バックアタック攻撃3枚, (5) サイド攻撃1.5枚(レフト), (6) ライト攻撃1.5枚(ライト))

1. マシン使用 1 日目

- (a) アタッカー選手 A
 - i. 動きが早くてよかった
- (b) アタッカー選手 B
 - i. 前 (ブロックマシン 1 号機) よりもずっと良くなった
 - ii. (ブロックが) 揃った時に手が前にくる感じが良い
 - iii. ロボットの手は人よりも見やすかった
- (c) アタッカー選手 C
 - i. いろいろなパターンが選べるのがよかった
 - ii. トスに応じて (ブロックの) つきかたが変わるとよい
- (d) アタッカー選手 D
 - i. 試合の流れで打つような感じがしてよかった
 - ii. ロボットの手は人よりも見やすかった
- (e) アタッカー選手 E
 - i. 音が大きいのでびっくりした
 - ii. 人のブロッカーよりも前にくる感じがした
 - iii. 手の見やすさは同じ
- (f) セッター選手 A
 - i. B クイックに 2 枚つく時が, 人のブロッカーよりもガッツリくる感じ
- (g) セッター選手 B
 - i. 人間のブロッカーだとミドルが遅れてつく時, 手を前に出す時と後ろに下げる時の両方がある

2. マシン使用 4 日目

- (a) アタッカー選手 E
 - i. 音に慣れてきて気にならなくなった
 - ii. その分, マシンの腕をしっかり見て打てるようになり, 打ち分けられるようになったと思う
- (b) セッター選手 A

- i. A, C クイックの時にマシンの腕が覆いかぶさってくる時に少し恐怖を感じる

(c) セッター選手 B

- i. 腕が最初からネットを出ているのは少し違和感, もう少しだけでも低ければ印象は違うと思う
- ii. 人間との動きの違いはあまりないと思う

3. マシン使用7日目

(a) アタッカー選手 A

- i. コーチがいない時には有用だと感じた
- ii. アタックに変化はない

(b) アタッカー選手 B

- i. ブロックを意識できるようになった
- ii. タブレット操作者の押すタイミングが合ってきてリアルになった
- iii. 人間の方が見にくいから難しい

(c) アタッカー選手 E

- i. ブロックを意識するようになった
- ii. チルト角が一定なのが見やすい

(d) アタッカー選手 F

- i. (スキルに関して) 変化はない, 慣れも特にない
- ii. 音でなんとなくどこにいるか分かってしまう
- iii. 人間の方が抜きにくい

(e) アタッカー選手 G

- i. 音には完全に慣れた
- ii. 助走時に (マシンが) どこに動くか予測できるようになった
- iii. アタックの変化はない
- iv. 人は目線でも予測してくる

また、現場のコーチから「アタック位置とブロック位置がしっかりと一致し、タイミングが一致すると、世界トップレベルのブロックが十分に再現されているといえる」といった意見があった。以下、選手からのフィードバックについて考察する。

1-(d)-i や 1-(e)-iii, 2-(c)-ii から、実際の人間によるブロック動作とブロックマシンのブロックの動作に大きな違いはないという意見があり、本システムとして自由度を限定したことによる動作の制限がある中で、概ねのブロック動作が再現できていることが示唆された。また 1-(a)-i から、ブロックマシン 1 号機からの改良機として、ブロックマシン 2 号機は速度向上が実際の練習現場で要求されている速度を満たしていることがわかった。さらに、1-(c)-i から、多様なブロック形態の提示が練習において重要な要素であることがわかった。

一方で、1-(b)-iii や 1-(d)-ii, 3-(b)-iii から、実際の人間の腕部、手指部よりもブロックマシンの方が見やすいという意見があり、選手によって視認性の違いがあることが報告された。マシンの動作は腕の動作に着目すると、肩関節における 1 自由度であり、またその姿勢変化も少ない。初期姿勢が鉛直上向き 0 deg であり、腕の内外転角度指定を 0 deg とした場合初期指定のままブロック形態が提示される。しかし実際の人間によるブロックは肩関節における 2 自由度の動作、および肘関節における動作などがあり、大きく姿勢を変化させながらブロック形態が提示される。この差異によって上記の意見につながったと考えられる。また、アタック動作において、助走動作から踏み込み動作、ジャンプ動作、アタック動作の流れの中で、アタッカーがどの対象をどのくらいの頻度・時間注視しているか、あるいは周辺視野でどの程度ブロック形態が見えているのか、といった視覚的要素が関係しているとも考えられる。選手の特徴によって、実際の人間による動作とマシンによる動作に違いがあると感じた選手と違いを感じなかった選手に分かれたのではないかと考えられる。

また、1-(c)-ii から、アタックの位置とマシンによるブロック位置の関係性に関する意見もあがった。特にサイド攻撃の練習において、Fig. 4.16 の機能を使用している時、ブロック形態は事前にパラメータをセットしているため、トスが短くなった時にアタッカーの目の前にブロック形態が出現されないシーンが観測された。また Fig. 4.18 の機能を使用している時においても、タブレット PC 操作者の判断やタップ入力の精度などの原因から、アタック位置とは離れた位置でマシンがブロック動作を行うシーンが観測された。これらアタック位置とブロック位置の関係性は本システムのトレーニングシステムとして重要な要素であるといえ、この位置誤差は練習効率の低下へと繋がる。そこで、上記改善のためのシステムについて 5 章で説明する。

2-(a)-ii や 3-(b)-i, 3-(c)-i から、アタッカーの意識的な変化が示唆された意見があがった。連続的に本システムを練習において使用することで、アタック時にブロックの状況を「認識」「判断」し、プレーを「選択」「実行」[55]する過程におけるオープンスキルの向上に寄与したと考えられる。例えば Fig. 4.25 におけるシーンにおいて、青で示したアタッカーが、ブロック形態を認識し、またその後方にいるレシーバーの位置・姿勢を認識し、現在アタッカーが置かれている状況を判断し、その中で例えば

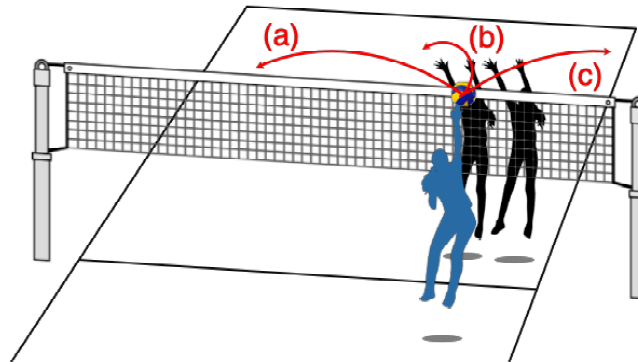


Fig. 4.25: アタックシーンにおけるブロッカーの認識・判断・選択・実行

(a)-(c)のアタックコースの中から適切なプレーを選択し、最後にそのプレーを実行していく必要がある。本システムはこのような状況における相手コート要因を把握し、また味方セッターからのトスの質などによる自コート要因を統合的に処理する過程でのトレーニングとして、効果的なトレーニング手法を提案できたといえる。

今後は練習の中での過程ではなく、環境・条件を統制した中で選手のスキル変化を検証していくことで、スキル向上のための知覚的・認知的要素を解明する手法へと発展すると期待される。例えば、アイトラッキングを用いた眼球運動の計測により、ブロックマシンに対して選手間でどの過程に相違があるか検証することが可能になる。ブロックマシンの動作は同一動作を定常的に提示することが可能であるため、これらの評価をプレー間・選手間で比較することが可能である。また、野球のメジャーリーグで活躍するイチロー選手は、自身の身体がどう球を見てどう動いて球を打っているかを言語化して説明する試みを行なっていると報告されている[56]ことから、トスからアタックまでの過程を言語化させ、ブロックマシンに対して選手間でどのような相違があるのか検証することが可能であり、こうした実験を行うことでスキル向上のための知覚的・認知的要素を解明することに繋がると考えられる。

4.2.8 ブロックマシンを使用した選手への影響

4.2.7項で説明した全日本女子合宿練習において、ブロックマシンを使用してアタック練習を行なった選手への影響を検証するため、合宿練習期間中におけるアタック打ち分け結果を解析した。上記合宿期間中において本システム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NTC2階キャットウォークからその様子を商用カメラ (Sony 社製, HDR-CX530V) で撮影し、映像として記録を残した。

アタックに関するオープンスキルを鍛えるためのトレーニングとして、その効果を

検証するためにはアタック決定率(=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かった。つまり実際の試合においては、相手コート内にブロッカー3人とレシーバー3人の計6人がプレーを行なっている一方、本システムを使用した練習においては、相手コート内に実質ブロッカー3人のみであった。そのため、実際の環境と異なるために試合時と本システム使用時のアタック決定率を単純に比較することはできない。そこで本論文ではアタック失点率(=失点/総打数)の指標によって評価を行うこととした。

本システムの継続使用に伴って、選手のアタック失点率の低下傾向が示されると、アタックに関するオープンスkill向上への寄与を示唆しているといえる。そこでまず、本システム使用時のアタックシーンにおけるアタック後の結果を以下の5つに分類した。

- (1) イン：
アタック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
- (2) ワンタッチイン：
アタックされたボールはマシンの手先や腕の端などに当たり、その後相手あるいは味方コート内に落下
- (3) ワンタッチアウト：
アタック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
- (4) ブロック：
アタック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
- (5) アウト：
アタック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、(3)は高い確率で得点、(4)および(5)は高い確率で失点、(1)および(2)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、という解釈ができる。つまり今回においては、アタック総打数に対する(4)と(5)の合計数の割合がアタック失点率に近似できると考えられる。

上述の評価指標を用いてサイド攻撃、クイック攻撃に分けて検証を行なった。バックアタック攻撃に関しては練習本数が少なかったため、検証の対象外とした。

まずはじめに、サイド攻撃におけるアタック失点率の検証について説明する。合宿練習期間内で計4名の選手が本システムを使用した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アタック総打数を Table 4.3 に、アタック失点率の推移を Fig. 4.26 に示す。1人の選手が6日間、2人の選手が3日間、1人の選手が2日間、本システムを使用した。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日目を除く計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主に Fig. 4.16 の機能を使用して操作が行われた。

Fig. 4.26 から、本システムの継続使用による選手4名のアタック失点率低下の傾向が示唆された。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 は、3日目以降アタック失点率が単調減少した。2日目のみ、アタック失点率が大きく増加した原因としては、2日目のアタック打数が少なかったことや本システムの使用初めでマシンに対して不慣れな状態であったことなどが考えられる。

選手 A の各日における結果の内訳の割合を Fig. 4.27 に示す。Fig. 4.27 よりアタッ

Table 4.3: サイド攻撃における各選手の使用回数

	Day of uses					
	1	2	3	4	5	6
Player A	45	10	16	31	19	20
Player B	8	18	32	-	-	-
Player C	71	7	2	-	-	-
Player D	11	9	-	-	-	-

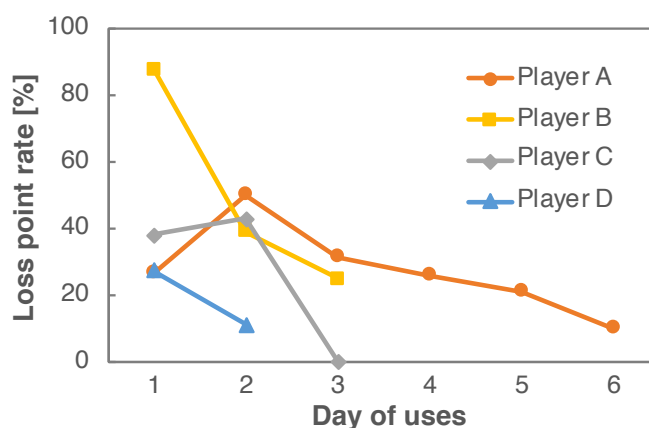


Fig. 4.26: サイド攻撃における各選手毎のアタック失点率の推移

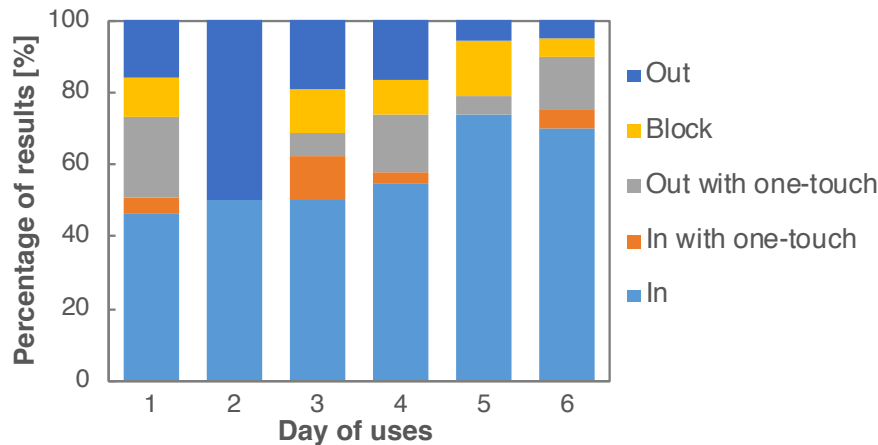


Fig. 4.27: 選手 A の各日におけるアタック結果内訳

ク失点率を表す (4) ブロックと (5) アウトの割合が本システムの使用を重ねるごとに減少傾向であるとともに, (1) インの割合が増加傾向であることがわかる. 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示唆された. つまりアタックに関するオープンスキル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) アタックに変化はない」との意見があった. つまり, 意図的にマシンによるブロック提示を外してアタック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アタック攻撃の練習を行ったところ, 日本代表選手と比較してアタック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明らかとなった. これは動作スピードやブロックの高さ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. 選手個々人に合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.

次いで, クイック攻撃におけるアタック失点率の検証について説明する. 合宿練習期間内で計 3 名の選手が本システムを使用したクイック攻撃 (A, B, C クイック) の練習に参加した. 各選手における使用日毎のアタック総打数を Table 4.4 に, アタック

失点率の推移を Fig. 4.28 に示す．なお，クイック攻撃における GUI アプリケーションは主に Fig. 4.18 の機能を使用して操作が行われた．この中でも，使用回数が多く継続して本システムを使用した選手 E, F に着目した．また Fig. 4.18 の機能では，ブロック枚数を 1, 2, 3 枚と指定できるが，条件を統制するためにブロック枚数が 1 人の時に限定して検証を行なった．

Fig. 4.28 から，本システムの継続使用による選手 3 名のアタック失点率の低下は示唆されず，一定の傾向が表出しなかった．サイド攻撃においてはアタック失点率の低下傾向が示唆された一方で，クイック攻撃においては特徴的な情報が現れず，また使用日毎の値のばらつきが大きい．サイド攻撃のアタック練習においては，ブロックの位置や高さなどのパラメータがプリセットされて動作する Fig. 4.16 の機能が使用されていたのに対して，クイック攻撃においてはトスやアタッカーの助走に応じてコーチのタブレット PC 操作により動作する Fig. 4.18 の機能を使用していた．そのため，コーチの判断能力やタブレット PC の操作精度によるブロック形態の提示が安定的に行われていたとはいえない状況であった．よって Fig. 4.28 の結果はアタッカーのスキ

Table 4.4: クイック攻撃における各選手の使用回数

	Day of uses							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Player E	42	20	25	26	15	16	46	26
Player F	29	20	22	26	42	40	34	18
Player G	19	20	23	17	-	-	-	-

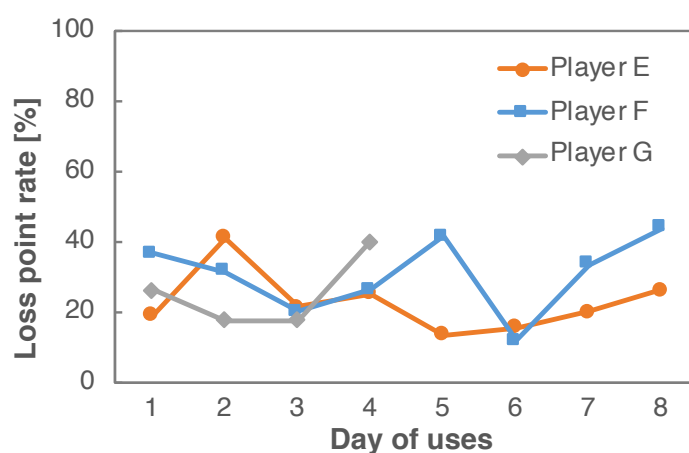


Fig. 4.28: クイック攻撃における各選手毎のアタック失点率の推移

ル変化の要因だけでなく、ブロッカー側の条件の変化による影響も含まれていることが考えられる。そこで、クイック攻撃におけるブロック形態の提示可能性を検証し、その結果をふまえてクイック攻撃における本システムの効果検証の考察に繋げることとした。

4.2.9 タブレット操作精度に関する検証

クイック攻撃において、アタック位置とマシンによるブロック位置に誤差が生じる原因として2点あると考えられる。1つ目はタブレットPC操作者(コーチなど)の判断能力、2つ目はタブレットの操作精度である。1つ目に関して、タブレットPC操作者は、アタッカーの助走の様子やセッター選手のトス動作を視認した後、アタック位置を事前に予測している。この予測における判断能力が影響していると考えられる。特に助走軌跡がネットに向かって斜め方向である場合、アタック位置予測は困難である。また2つ目に関して、予測したアタック位置をタブレットPCにおいて画面をタップして位置指定を行うが、手動操作であることが起因し、タブレットの操作精度(タップ精度)が影響していると考えられる。特に目の前の状況を把握し視線を移しながらタブレットを操作するため、通常よりもタップ精度が落ちると考えられる。

そこでブロック形態の提示可能性を検証するために、本システム使用日毎のアタック位置指定精度を解析した。クイック攻撃に対するマシン1枚ブロック時における、アタック位置(アタッカーがアタックしたタイミングにおけるアタッカーの重心位置)とマシンによるブロック位置(アタッカーがアタックしたタイミングにおけるマシンの重心位置)の位置誤差を使用日毎に映像データから解析した。アタック位置に対して、マシンの1体分の横幅以内でブロックが行われた(Fig. 4.29(左))本数を手動でカ



Fig. 4.29: タブレット操作によるブロック位置指定精度(左：成功例，右：失敗例)

ウントし、使用日毎にアタック総本数に対する割合を算出した。この指標をアタック位置指定精度と定義する。

Fig. 4.30 に合宿練習における使用日毎のアタック位置指定精度の変化を示す。また参考として Table 4.5 に使用日毎のタップ回数を示す。日を重ねるに従って、アタック位置推定精度が上昇傾向であることがわかった。これは、アタッカーのアタックコースをブロックマシンが遮った割合が増えていたことを意味しており、合宿練習後半の方がより良いブロック形態を提示していた確率が高かったといえる。

そこで、合宿練習の前半4日間と後半4日間に分割し、選手E, Fのアタック失点率、およびアタック位置指定精度をそれぞれ合算して解析した (Fig. 4.31)。Fig. 4.31 より、アタック位置指定精度は前半4日間と後半4日間の間で有意に向上しているが、選手Eのアタック失点率はやや低下傾向、選手Fのアタック失点率は概ね横ばいとなった(両者とも有意な差は認められなかった)。マシンによるブロックに対する選手への適応がないとすれば、アタック失点率は上昇するはずであるが、両選手ともアタック失点率は低下、あるいは横ばいであった。そのため、アタック時にブロック形態をしっかりとしてアタックを打ち分けているといえ、クイック攻撃に関しても、サイド攻撃

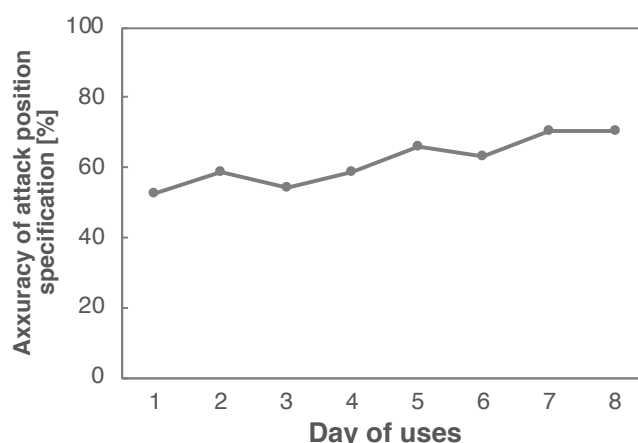


Fig. 4.30: タブレット PC 操作者によるタブレット操作指定精度の推移

Table 4.5: タブレット PC タップ回数の推移

	Day of uses							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Number of taps (1 block)	38	34	22	41	73	54	68	54
Number of taps (total)	95	50	55	61	80	96	131	68

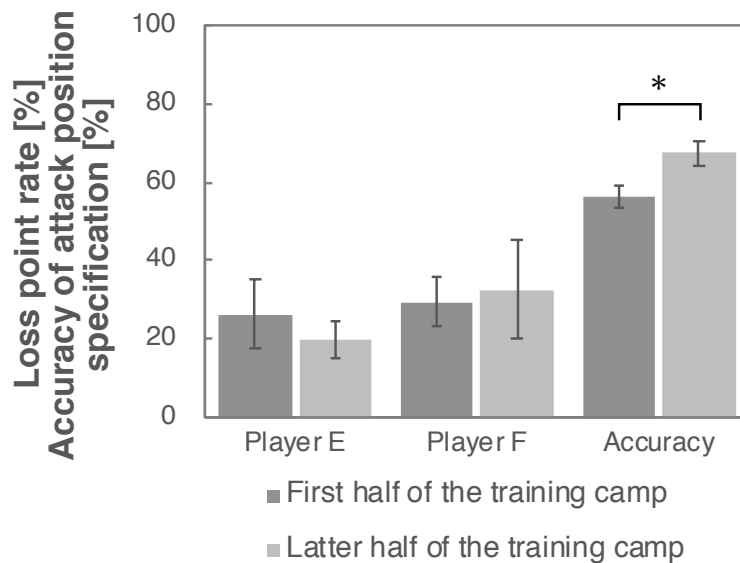


Fig. 4.31: 合宿練習期間中における前後半別のアタック失点率とタブレット操作指定精度

同様，アタックに関するオープンスキル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．

4.2.10 考察

本項ではブロックマシンシステム 2 号機について説明し，ブロックマシン 1 号機の改良システムとして，改めて実際の練習現場の要求を満たすシステムデザインを行い，システムの設計，開発，評価を行うとともに，練習合宿における本システムの継続使用による選手への影響を検証し，本システムの効果・有効性について示した．

ブロックマシン 2 号機では，動作速度，およびブロック形態の提示性能において世界トップのスキルレベルを有しているといえる．また本システムを練習において柔軟に使用するための GUI アプリケーションを新たに提案し，様々な練習シーンにおいて使用された．8 日間の練習合宿では，本システムの使用日数を重ねる毎に，サイド攻撃に関しては選手のアタック失点率の低下傾向が確認された．一方でクイック攻撃に関しては特徴的な傾向は表出しなかったが，日数を重ねる毎にブロックレベルが向上している相手に対して，アタック失点率が大きく上昇しなかったことから，アタック技能向上のためのトレーニングシステムとしての有効性が示唆された．今後はより中長期的な本システムの使用による効果を検証するとともに，実際の試合への貢献に

についても議論していく。

本システムの実践における練習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、Fig. 4.16やFig. 4.18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程度の効果を見出せると考えられる。

本システムの使用によって選手への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、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は困難である。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Fig. 4.24(5)や(6)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1-2m程度ネット中央に寄ることとなる。またクイック攻撃時においても、瞬時にブロック位置を指定できる機能を有しているが、手動操作による精度の問題から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シーンが観測されている。アタック位置とブロック位置の誤差は練習効率の低下に直接影響するといえるため、システムが自動でアタック位置を予測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、自動でアタック位置を予測する手法について説明する。

ブロックマシン2号機は全日本女子代表チームの練習のみならず、大学生やU-19、高校生の女子日本代表チームなどの練習合宿においても継続的に使用されている。マシンの使用回数や効果などについては割愛するが、これらの事例からも本システムがトレーニングシステムとしての有効性を十分に有しているといえる。この状況をうけて、女子チームだけでなく、男子チームにおいてもブロックマシンを使用したい、といった現場からの要求があった。そこで4.3節で男子選手への対応について説明する。

4.3 男子選手への対応

ブロックマシン2号機の継続的な実運用を通して、これまで女子選手を対象としてシステムデザインが行われてきた本システムの男子選手への対応化の要求が現場からの意見としてあがった。必要性の理由として、特に男子代表チームでは世界レベルの高さのブロック形態が日常的な練習現場において提示困難である、ということがあげられる。女子チームにおいては、身長の高い男子選手に対してアタック練習を行うことで世界レベルの女子の高さを体感することができる。一方で男子チームにおいては、それ以上に高い選手を招集することが困難である。

そこで本システムを男子選手にも対応可能なシステムとし、男女兼用のトレーニングシステムを提案する。以下、ブロックマシン男女兼用化のシステム設計、構築、実運用による評価について以下に述べる。

4.3.1 設計指針

バレーボールにおいて、男子と女子の大きな違いはネットの高さと身体能力の差であるといえる。基本的なコートの大きさやボールの違いはないが、ネットの高さのみ男子が2,430 mm、女子が2,240 mmとルールが決められている。また身体能力の差として、アタック時の打点の高さが男女で異なるだけでなく、アタック後のボール速度も大きく異なる。そこでブロックマシン男女兼用化システムとして、マシンのジャンプ高さの変更、および強度向上の変更をブロックマシン2号機に対して施すこととした。

そこでまず、世界トップのスキルレベルにおける男子選手のブロック高さを調べた。

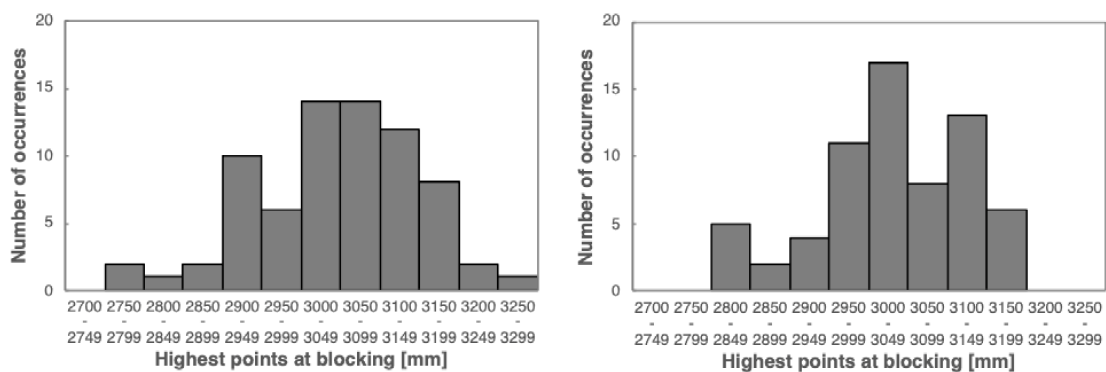


Fig. 4.32: 国際試合における男子ブロッカーのブロック高さ (左: ブラジル, 右: ロシア)

2013年に開催された国際大会であるワールドグランドチャンピオンズカップにおけるブラジル対日本戦，およびロシア対イラン戦を検証対象とした．当時ブラジルはFIVB世界ランキング1位，ロシアは同2位に位置していたチームであるため，これらの国におけるブロック高さを再現することが本システムの目標となる．対象試合をエンドライン後方2視点から撮影を行い，その映像を用いて実際のブロック動作の解析を行った．2視点映像による3次元位置推定に関しては，3.1.1項を参照されたい．

ブラジルのブロック全72シーン，およびロシアのブロック全66シーンにおけるブロック動作時の最高点の出現頻度を表したグラフがFig. 4.32である．Fig. 4.32(左)がブラジルのブロック高さを示しており，平均3,050 mm，最高3,240 mmであった．また，Fig. 4.32(右)がロシアのブロック高さを示しており，平均3,030 mm，最高3,190 mmであった．これらの解析結果を踏まえてシステムの設計，構築を行なった．

また，男女間でアタック後のボール速度も大きく異なるため，ブロックマシン2号機における肩関節部を改良することとした．現状のままでは，マシンにかかる負荷が大きくなり過ぎてしまい，機構やモータが早期に故障が発生する確率が高い．そこでゴムの弾性を用いて衝撃力を吸収する方式を採用した．

4.3.2 システム構成

ブロックマシン2号機の男女兼用化への設計指針を受けて，マシンのジャンプ高さ変更および強度を向上させたシステム全体概要図をFig. 4.33に，マシン単体の概要



Fig. 4.33: ブロックマシン男女兼用化におけるシステム概要図(男子公式高さにおける初期姿勢)

図を Fig. 4.34 に示す．変更点として，マシンのジャンプ機構のストローク長をこれまでの 600 mm から 1,100 mm とした．ストロークの延長化に伴い，腕の前傾動作機構と機構上干渉してしまうが，ブロックマシン 2 号機の練習現場における使用実績から，腕の前傾動作の重要度が低く，これまで該当軸の駆動を行なっていなかったことから，前傾動作機構を取り除いてストロークを長く確保することとした．結果としてマシン最低点が 2,321 mm，マシン最高点が 3,271 mm でジャンプ動作が可能となる．これにより，男子の世界トップレベルである 3,200 mm 以上の高さのブロック形態を提示できるだけでなく，マシンの最低点が女子のネット高さ付近となっていることで，男女兼用システムとして使用できる．また同時に，GUI アプリケーションの改良も行い，これらの高さに対応できるよう機能を付与した．

ジャンプ動作機構変更後のジャンプ動作のストローク推移を Fig. 4.35 に示す．各目標高さにおける時間経過に対するストロークの軌跡をそれぞれ示しており，最高点の 3.2 m のブロック形態を提示する場合においても，1,000 ms 以内に到達可能であり，十分に現場の要求速度を満たしているといえる．なぜなら，3.2 m のブロック高さが提示されるシーンは，主にサイド攻撃に対するブロック時であり，ミドルマシンがネッ



Fig. 4.34: ブロックマシン男女兼用化におけるマシン単体概要図

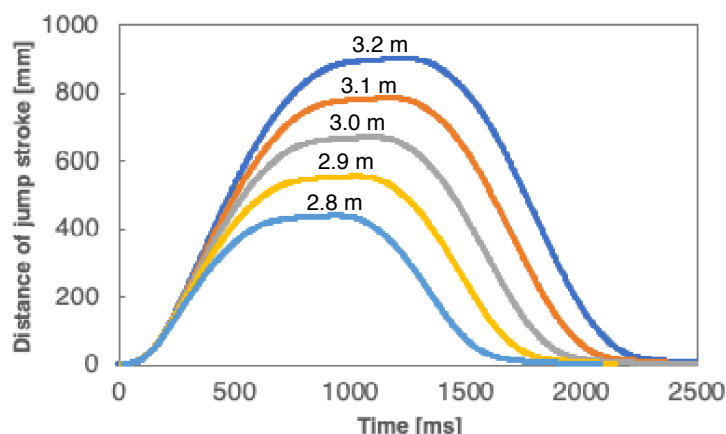


Fig. 4.35: 各目標ジャンプ高さにおけるストローク推移

ト中央からサイドまでに到達する時間は最短で 1,100 ms であるために時間内にブロック形態を提示できるためである,

また強度向上のため, 肩関節部においてゴムバッファのみによる接合とすることで, 腕にかかる力を弾性変形により吸収させ, 肩関節部より下方に力が伝わらないような機構とした (Fig. 4.36). Fig. 4.36 内で青部が下方, 赤部が上方, 黒部がゴムバッファを示しており, 使用したゴム硬度はショア A55 である.

ブロックマシン男女兼用化システムとして, 強度・耐久性を試験するために, サーブマシン (Sports Attack 社製, TOTAL ATTACK) を用いて男子のトップスキルの選手のアタックを再現し, ブロックマシンに対して検証を行なった. サーブマシンは3つのローラを用いてボールを押し出す機構を有する, 特にサーブ練習に用いられる機械である. 最高速度で約 150 km/h となるため, 世界トップレベルの男子のアタック速度以上のアタックを十分に再現できる [57]. サーブマシンの打点高さを約 3 m の位置にセットし, 約 50 球ブロックマシンのブロック動作時に腕に当たるようにした. また, 練習現場のコーチによるアタック試打も行い, 結果として十分な強度・耐久性を確認するとともに, 男子のブロック形態の提示有効性を検証した.

4.3.3 実運用による評価

ブロックマシン2号機における男女兼用化対応を行い, その後 2018 年において男子日本代表チームの練習合宿期間中におけるアタック練習内で計 5 日間使用された (Fig. 4.38). 各日における使用回数と使用時間を Table 4.6 に示す. 女子日本代表と同様, サイド攻撃やセンター攻撃, バックアタック攻撃など, 様々なアタック練習に対

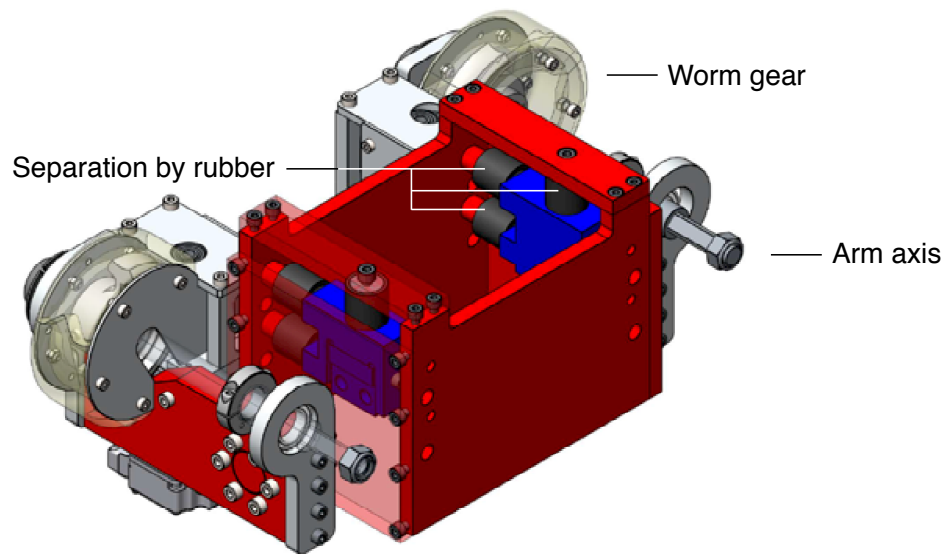


Fig. 4.36: ゴムの弾性を用いた衝撃吸収機構 (肩関節部：赤と青で示した部分を分離)

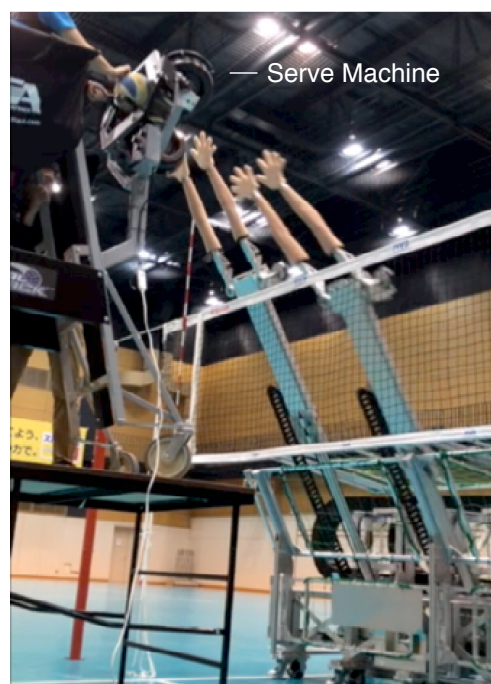


Fig. 4.37: サーブマシンを用いた強度・耐久性試験



Fig. 4.38: 実際の練習現場におけるブロックマシン男女兼用化システム使用の様子

Table 4.6: 男子チームにおける使用回数

	Day of uses				
	April	April	May	July	July
Number of uses	81	221	139	160	132
Practice time	20 min.	60 min.	30 min.	50 min.	40 min.

して本システムは使用された。特徴的な使用例として、タブレット PC をチームの分析アナリストの方が操作しており、アタック練習において 1 球ごとにブロック形態の腕の角度やブロック位置、高さなどを変更していた。

ブロックマシンを使用した練習に参加した選手から「日本の男子バレーの選手がブロックした場合と、海外の選手がブロックした時の違いがすごくある」といった問題意識を前提とした上で「実際にブロックマシンを体感して、海外の選手によるブロックのスピードや高さ、硬さが再現できており、手の出し方も海外の選手のようにできていた」といった感想があった。このことからブロックマシンによるアタック練習は男子選手へも有効であったことが示唆された。

5 日間のブロックマシンを使用した練習を通じて、練習に参加した選手へ主観評価のアンケート調査を行った。質問した項目は以下の 7 項目で、1:全く同意できない (Strong disagree), から、5:非常に同意できる (Strong agree), の 5 段階で回答をしても

らった。本アンケート調査は上記練習合宿最終日から数3ヶ月経過後にオンライン上で行い、約1週間後に全回答を回収した。回答数は8選手であった。

Q1 実際のブロッカーの動作を再現していると感じられた

Q2 特定の相手選手・相手国のイメージを重ねて練習に挑んだ

Q3 マシンの動きが単調で、繰り返し練習するうちに慣れてしまった(練習の効果を
感じなくなってしまった)

Q4 アタック直前までブロックの形を見極められるようになった(空いているコース
を直接・周辺視野で確認できるようになった)

Q5 アタック直前までブロックの形を見極め、アタックを打ち分けられるようになった

Q6 高さのある相手国のブロックに対して、以前よりも心に余裕をもって試合に挑む
ことができた

Q7 ブロックマシンを使用した練習は今後、頻度を増やしたい

男子選手の各質問に対する主観評価値の結果を Fig. 4.39 に示す。Q1 の結果から、ほとんどの選手(6選手)が、ブロックマシンの動作は再現性が高いと回答している。また Q3 の結果から、半数以上(6選手)の選手はマシンに対する慣れは感じていないと回答している。さらに Q7 の結果から、ほとんどの選手(7選手)が今後のブロック

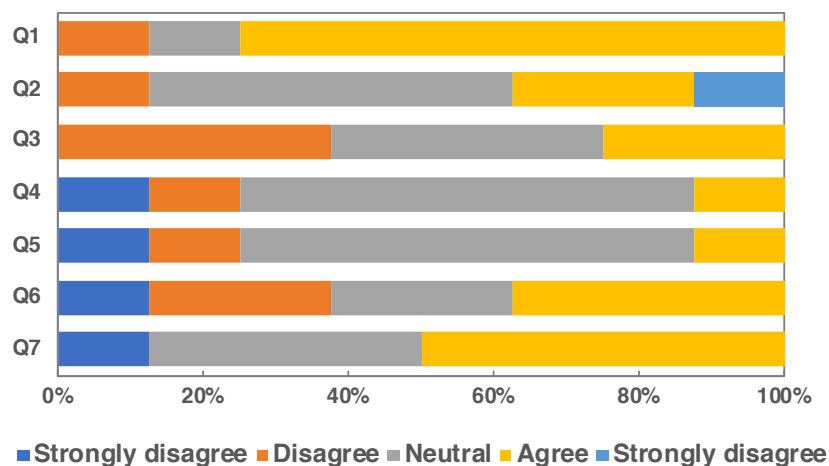


Fig. 4.39: 男子選手の主観評価値

マシンを使用した練習を継続していきたいと回答しており、その中の4選手は頻度を増やしたいと回答している。これらの結果より、ブロックマシンのアタック練習への貢献は十分にあったといえる。

一方で、Q4, Q5の結果から、アタックスキルの変化に関する回答がほとんど見られなかったことから、継続使用の必要性も示唆された。トップレベルの選手では、本来のスキルが非常に高いために、容易に身につくものでもないと捉えることもでき、今後は継続的な使用による影響を検証していく必要がある。また、1名の選手がQ4-7に対して全く同意できないと回答していることが明らかとなった。練習現場の関係者から「ブロックマシンに対して苦手意識を持っているかもしれない選手が1名いる」といった意見があがっており、具体的な理由は明らかとなっていないが、良い印象を持っていない選手がいることも明らかとなった。高速で動作する機械に対する恐怖心や実際のブロッカーの動作との乖離などの理由が考えられるため、今後の課題として慎重にヒアリングなどを行い、解決していく必要がある。

また、アンケート調査では同時に以下の3つの質問に任意で回答してもらった。

- (1) ブロックマシンの練習において、アタック練習として良かった点(通常の練習ではなかった点)
- (2) ブロックマシンの練習において、アタック練習として悪かった点(通常の練習の方が良かった点)
- (3) その他、感想や意見など

Q1に関しては、「高さのある相手に対しての練習は出来た」「ブロックの硬さがうまく再現できていて、ブロックアウトを取る練習として役に立った」「世界の高さをイメージできる点」といった意見をあつた。Q2に関しては、「最後に手を動かすなど個人の特徴あるブロックに対する練習はあまり出来なかった」「空中での駆け引きが無いので、抜こうと思えば抜ける」「当然助走とかがないため、事前モーションがなく急にブロックが出てくるため予測しづらい」といった意見があつた。また、Q3に関しては、「ボールが近い時の、得点シーンとして押し合いやチップでブロックアウトが多いが、ブロックマシンとはその状況を鍛錬できるマシンになっていないように感じる」といった意見があつた。

以上の結果より、ブロックマシンの男子選手への貢献として、ブロッカーの身体的特性やブロックの高さの再現が有効であったといえる。特に全日本男子チームは世界のトップチームと比較しても平均身長が低く、それ故に高さに対する対応が必要であると報告されている[58]。一方で、ブロック動作の詳細な特徴や駆け引き[59]などの人間味に起因する要素に関する指摘点もあり、ブロックマシンを使用するトレーニン

グで有効な要素，不得意な要素を現場の指導者が判断し，効果的なトレーニングを行えるように組み合わせていく必要性があることもわかった。

4.3.4 考察

本項ではブロックマシン男女兼用化について説明し，ブロックマシン2号機の改良システムとして，男子選手へ適応するためのシステムデザインを行い，システムの設計，開発，評価を行うとともに，実際の練習合宿における本システムの使用による選手への影響を検証し，本システムの効果・有効性について示した。

ブロックマシンシステムは，女子選手同様，男子選手に対しても有効なブロック形態を提示できることがアンケート調査により明らかとなった．特に男子選手に対しては，ブロックの高さが最も重要度の高い練習要因であることも示唆され，日常的な練習において世界の高さを有するブロック形態が提示できる点が最も評価された．今後は男子選手においても，本システムの継続使用によるスキルへの影響を検証していく必要がある。

4.4 本章のまとめ

本章で説明したブロックマシン1号機，ブロックマシン2号機，ブロックマシン男女兼用化について，それぞれまとめて考察し，本章のまとめとする。

ブロックマシン1号機は3章で説明したブロkkerの身体的特性を考慮したブロックボードを受けて，実際の練習現場の要求を満たすインタラクティブシステムであった．ブロック動作を提示するために，腕の動きの提示や実時間での状況生成，複数人でのアタックコース限定などの実践的要求に対して，動的にブロック形態を提示するシステムを提案した．横移動動作に関する速度不足から，ミドルマシンの初期位置が実際の人間のブロkkerとは一部異なるものの，アタックコースを遮るブロック形態が提示され，アタッカーのオープンスキルに寄与する結果が得られた．これにより，特に最終的なブロック形態の提示が1つの要素として重要であることがわかった。

ブロックマシン2号機は，ブロックマシン1号機の実践における運用を通じて表出した問題点，改良点を反映したシステムであった．特にミドルマシンの横移動動作における速度の向上，操作GUIアプリケーション自由度向上に着目し，多くの実践練習での活用が行われた．時々刻々と変化する相手コート状況を把握，予測した上で行動選択する，オープンスキルとしての重要な要素に寄与し，またブロックの高さや速度が世界トップのスキルレベルと同等であることが示されたため，本システムに対す

るトレーニング効果が明らかになったことは、実際の国際試合におけるスキル発揮へと繋がると考えられる。

ブロックマシン男女兼用化は、ブロックマシン2号機を男子選手へ発展したシステムであった。特に世界トップの男子選手へ合わせたブロック高さの提示が有効であることがわかり、男女の性別に関わらず、時々刻々と変化するブロック状況を把握するオープンスキルに關与するアタクトレーニングの有効性が示された。

また男女のトップチームだけでなく、大学生や高校生などの女子チームにおける運用をうけて、様々な年齢やスキルレベルの選手がブロックマシンに対して練習を行っており、現場の監督やコーチから高い評価を受けている。特徴的な貢献として、世界のブロックのイメージを言葉で伝えるよりも体感できることの価値は大きい、といった意見があった。実践的に身体を通じたインタラクションがトレーニングに与える影響が大きく、またこれらが性別やスキルレベルに依存していないことから、本システムがブロック動作の本質を再現しているといえる。

また実際の練習現場からの実践的要求を満たす手順の第2ステップとして、実践的要求の「1. 3体程度の機械が横にスライドして動き、ブロックする」および「2. ネット下にレールがあり、そのレール上を選手台の人形がスライドして動く」および「4. (略)腕関節の動き(略)」を解決したシステムであるといえる。

ブロックマシンの動作自由度が限定(各マシン当たり、横移動動作、ジャンプ動作、左右各腕内外転動作の4自由度)されていることについて考察する。人間の動作自由度を考慮すると、肩関節の伸展屈曲動作や肘関節の動作、体幹の捻る動作なども重要であると考えられる[60]。しかし実際に練習においてブロックマシンに対してアタック練習を行った選手からは、マシンによる動作に違和感がある、といった意見はあがらなかった。ここで、アタッカーがアタック動作を行う時の注視点に着目することで、動作自由度限定に関して考察する。例として中田らによる、大学生を対象とした注視実験[45]について触れる。関東大学バレーボールリーグ1部に所属する大学男子バレーボール部員のレギュラーまたは控えの選手10名(平均年齢20.1歳, SD=1.2, 平均競技経験年数10.4年, SD=2.9)を上級群, 大学でベンチ登録されたことのない男子バレーボール部員10名(平均年齢20.8歳, SD=1.1, 平均競技経験年数9.3年, SD=2.1)を中級群とし、注視時間割合と注視移動回数を計測している。注視時間割合はEMR(視線計測機器)に記録された各項目の分析対象時間のうち、注視を行なった時間、注視移動回数は注視対象が他の対象へ切り替わった回数として定義されている。上級群におけるアタック時の注視時間割合は、ボール41.87%(SD=11.49%), ブロッカー3.06%(SD=8.66%), セッター9.31%(SD=6.87%), 中級群は、ボール45.00%(SD=9.45%), ブロッカー3.15%(SD=5.97%), セッター11.58%(SD=6.48%)と報告されている。また上級群におけるアタック時の注視移動回数は、上級群6.1回(SD=2.1回), 中

級群 7.5 回 ($SD=1.2$ 回) と報告されている。これらの結果から、アタック動作時におけるアタッカーの視覚探索として、ブロック形態を詳細に視認している可能性は低く、重要なタイミングのみ注視移動をし、それ以外は予測で補っていること、あるいは周辺視野による把握をしていることが考えられる。そのため、ブロックマシンによるブロック動作が完全に実際のブロッカーによるブロック動作を再現している必要はなく、動作開始のタイミングとブロック形態完成のタイミング、および時事刻々と変化する相手コート状況の提示が重要であるといえる。

一方で、本章内でも問題点として触れたが、アタック位置とブロック位置の誤差の重要性はトレーニング効率に影響していることは本システムの課題である。事前にブロック位置を決定づけるサイド攻撃においては、トスが短くなったときにブロック位置を修正することができず、アタック練習の意味をなさない。またクイック攻撃に関してはアタック直前にブロック位置を指定できるものの、タブレットの操作に慣れが必要であり、数百回の操作を経ても 7 割前後の効率である。さらに、タブレットの操作は練習現場における監督やコーチなどの指導者が行うため、1 人分のリソースを占有してしまう。

これらの課題は現場からも改善要求があり、位置誤差を低減させることでより効率のよいアタクトレーニングを行うことができるだけでなく、より少ない人数でオープンスキルを向上させるシステムを構築することができ、それに伴いシステム使用頻度が上がると考えられる。これにより多くのアタック打ち分けデータを蓄積することができ、システムに反映させることで好循環が生まれる。そこで 5 章ではシステムが自動でアタック位置を予測し、自動でマシンが動作することでブロック形態を提示する手法について説明する。

第5章 リアルタイムトラッキングによる自動制御システム

第4章で説明したブロックマシンにおいて、タブレットPC操作によるマシンの自動制御手法を採用したことにより、多様な練習メニューに組み込まれ、また可用性の高いシステムが構築された。その一方で、4.4節で説明した通り、サイド攻撃およびクイック攻撃における改良点も表出した。そこで本章では、現場の監督やコーチなどの人による手動操作ではなく、システム側が自動で選手やボール位置を推定し、アタック位置を予測し、自動でマシンが動作することでブロック形態を提示する手法について説明する。

また、1.2節で述べた実際の練習現場からの実践的要求を満たす手順の第3ステップとして、実践的要求の「4. センサーを介した反応の良さ (略)」を解決するシステムとしての位置付けにもなる。

5.1 研究背景

スポーツシーンにおける選手・ボール位置の推定手法に関する研究はこれまで多く行われている [61][62][63][64]。選手・ボール位置を推定する手法として複数台のカメラを用いた画像処理による手法やモーションキャプチャシステムによる手法などが挙げられる。画像処理による手法は例えばボール画像の色相情報を用いてボール位置を推定する手法 [46] や、ユニフォームの色相情報 [65] や背番号 [66] を用いる手法などが挙げられる。これらの手法は一般的に高い認識精度を示しているが、その対象シーンのほとんどは試合映像であり、一方で本研究が対象となるのは練習中におけるシーン (以下、練習映像) である。スポーツシーンにおける試合映像と練習映像で大きく異なる点を Table 5.1 にまとめ、従来提案されている手法の、本研究への適用可能性が低いことを説明する。

試合映像では、コート内の選手は各チームのユニフォームを着用しており、事前に選手位置を推定するための手がかりを得ることができる。そのため、ユニフォームの色相情報から位置を推定する手法やテンプレートマッチングを用いる手法、機械学習

Table 5.1: 試合映像と練習映像の比較

試合映像	練習映像
選手は常にユニフォームを着用	選手はそれぞれ練習着を着用
映像に映る選手，ボールの数が一定	映像に映る選手，ボールが多数点在
映像内のシーンの流れが一定 (ルール規定)	映像内のシーンの流れが不定

などの手法が適用可能である．一方で練習映像では，基本的に選手は練習着を着用しており，特徴的な情報を抽出することは困難である．また選手にマーカを装着する手法なども考えられるが，スポーツシーンにおいて煩わしい手間を要する手法は好まれない．そのために従来の手法による選手位置推定は困難である．

また試合映像では，映像に映る選手が1チーム6人，ボールが1つと固定されており，どの選手が何の役割を有した選手かを把握することが容易であり，また認識の上限数が制限されるために推定精度が高くなる．一方で練習映像では，選手だけでなく監督やコーチなどの指導者もコート内に映り込み，その人数も不定であるため，画像認識における推定が困難となる．またボールも多数(複数個，最大10数個)点在しているため，その時に練習の対象となるボールを特定することが困難である．

さらに試合映像では，映像内のシーンの流れがルールによって決められているために一定である．例えばバレーボールのシーンでは，一連の流れは必ずエンドライン後方選手からのサーブから始まり，レシーブ，トス，アタックの順番で各パフォーマンスが行われて試合が進む(例外のシーンも含む)．つまり試合の状況把握を容易に行うことが可能である．一方で練習映像では，常にサーブから始まるとは限らず，プレーの初めからレシーブやトスの流れでアタック練習を行うことも多くみられる．このことから，練習映像におけるシーン推定が困難であることがわかる．

5.2 設計指針

5.1 項で説明した通り，従来の画像処理による手法では，本システムにおける適用可能性が低い．またモーションキャプチャなどの手法は，練習毎に選手の身体へマーカなどを取り付け/取り外しをしなければならず，煩雑な手間を要するだけでなく，スポーツの分野では身体動作を阻害する要因となるため，非装着な手法である必要がある．また，ブロックマシンへ適用することを考慮すると，可能な限りシンプルな構成で可用性を高める必要がある．

さらにブロックマシンシステム特有の問題として，ブロックマシンの動作速度を考慮すると，アタック時刻(アタッカーがアタックする時刻)の0.6秒よりも前の時刻ま

でにアタック位置を予測する必要がある。そこで本研究は選手軌跡とボール軌跡を用いてハイブリットなアタック位置予測手法を提案する。

選手の位置推定手法として OpenPose[67] を用いて人物の骨格情報の推定を、ボールの位置推定手法として YOLO[68] を用いてバレーボールの位置推定を行う。OpenPose は、CNN を用いて高速・高精度に人の骨格情報を推定できる画像認識の手法であり、オクルージョンに対しても頑健であり、着衣によらずコート内の複数の選手の状態をリアルタイムで推定することができる [69]。これにより、ユニフォームや練習着に影響を受けない選手位置推定が可能となる。

5.3 選手位置軌跡を用いたアタック位置予測

5.3.1 選手位置推定手法

選手の位置推定手法として OpenPose[67] の手法を適用し、その画像特徴点を用いる。OpenPose で得られる特徴点は Fig. 5.1 に示す通りであり、鼻・首・両肩・両肘・両手首・両尻・両膝・両足首・両目・両耳の 18 点である (v1.3.0)。本研究で用いる特徴点である 2-13 のみ略称を併記している。OpenPose のライブラリは、画像を入力情報とし、その画像内で認識された人数、および各人における特徴点の画像座標と信頼スコアが出力される。そこで本研究では両足首 (RA, LA) の中点を選手位置とし、その位置推移を選手の軌跡とする。

処理の流れを Fig. 5.2(左) に示す。OpenPose による画像処理は多くの時間を要するため、リアルタイムで推定するために単眼映像での選手位置推定を行う。また選手同



Fig. 5.1: OpenPose により得られる 18 特徴点

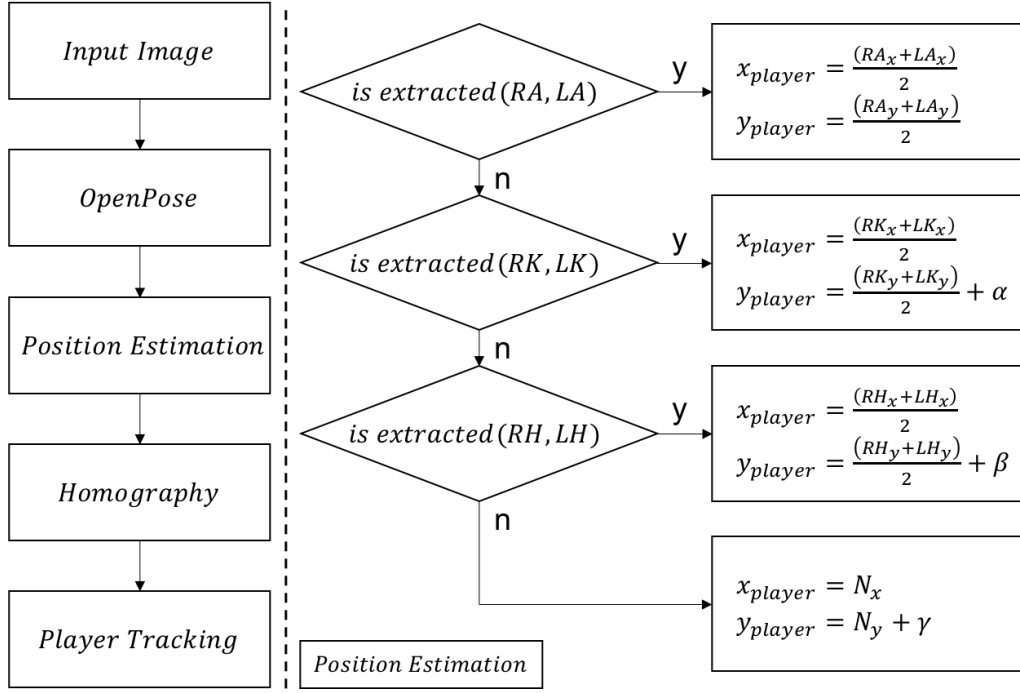


Fig. 5.2: 選手位置推定アルゴリズム

士のオクルージョンを回避するために、体育館2階から俯角をつけて撮影された映像を用いる。アタックシーンを含む練習映像に対して、各フレームを画像ファイルとして分割し OpenPose を用いて選手位置推定を行う。得られた特徴点の座標値は画像座標値となるため、バレーボールコートの特徴点を用いて射影変換を行い、コート座標値を得る。次いで、各フレームのコート座標系における選手位置を、フレーム間の近傍位置を対応づけて同一選手の位置軌跡として動作の認識を行う。なお、選手同士のオクルージョンなどにより両足首の画像座標値が取得できない時は両膝の midpoint、または両尻の midpoint、または首の特徴点を用いて代替値とする (Fig. 5.2(右))。添字は画像左上を原点、右方向 x 軸正方向、下方向 y 軸正方向とするときの画像座標の x, y 座標値である。α, β, γ の画素数については実験的に算出した。

画像座標値からコート座標系への射影変換について説明する。射影変換前の画像座標を (x_i, y_i) 、変換後の画像座標を (X_i, Y_i) とすると、変換式は 5.1 式で表される。

$$X_i = \frac{a_1 x_i + a_2 y_i + a_3}{a_7 x_i + a_8 y_i + 1}, Y_i = \frac{a_4 x_i + a_5 y_i + a_6}{a_7 x_i + a_8 y_i + 1} \quad (5.1)$$

なお、5.1 式における変換係数 $(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8)$ は、事前に 4 点 (センターライン両端と手前アタックライン両端の 4 点) の対応点から 5.2 式によって算出する。

センターライン両端とアタックライン両端で囲まれる特徴点は、長辺 9,000 mm, 短辺 3,000 mm の長形状の既知スケールであることから、これらの特徴点を用いる。ここで、本手法は2次元射影変換となるため、高さ情報は失われる。そのため選手のジャンプ動作などはカメラと反対方向への移動と区別がつかない。一方で後述するアタック位置予測手法において、推定するシーンにはアタック動作は含まれないため、影響はないといえる。

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_1x_1 & -X_1y_1 \\ x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_2x_2 & -X_2y_2 \\ x_3 & y_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_3x_3 & -X_3y_3 \\ x_4 & y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_4x_4 & -X_4y_4 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -Y_1x_1 & -Y_1y_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & 1 & -Y_2x_2 & -Y_2y_2 \\ 0 & 0 & 0 & x_3 & y_3 & 1 & -Y_3x_3 & -Y_3y_3 \\ 0 & 0 & 0 & x_4 & y_4 & 1 & -Y_4x_4 & -Y_4y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \\ a_8 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

アタック位置を予測するにあたり、ブロックマシンの動作速度を考慮すると、アタックが打たれる時刻から約 600 ms 前に予測値を推定する必要がある。またアタックのタイミングを認識するにあたり、セッターのトス動作を認識する必要がある。そこでセッターのトス動作を、両腕の挙上動作 (5.3 式, Fig. 5.3) として定義する。5.3 式の条件により認識されたトス動作の時刻 (T_t) とアタック動作の時刻 (T_a) の時間差は、時間余裕 T_m ($T_m = T_a - T_t$) として定義される。予備実験から、ほとんどのクイック攻撃において、時間余裕が 600 ms 以上あることが確認された。そこでトス動作を認識のタイミングとし、それ以前のアタッカーの動作軌跡から打点位置を予測する。

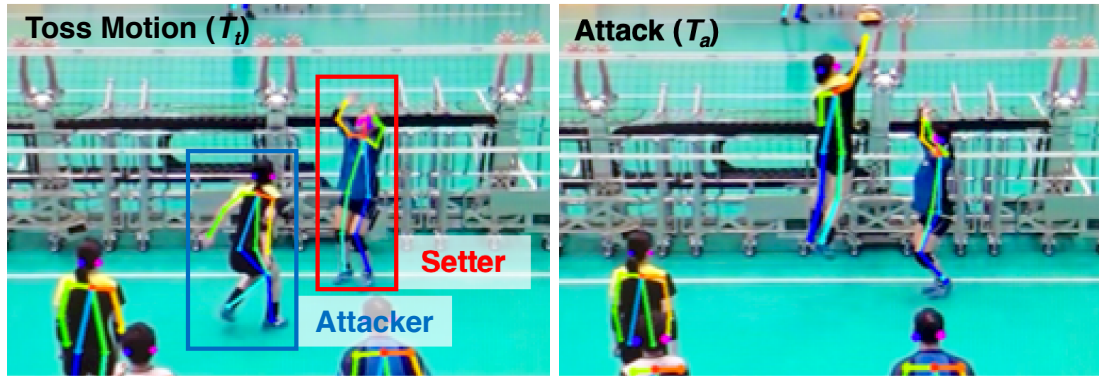


Fig. 5.3: トス動作認識と時間余裕

$$\begin{cases} RS_y < RE_y < RW_y \\ LS_y < LE_y < LW_y \end{cases} \quad (5.3)$$

セッターのトス動作が認識されるまでのアタッカーの位置軌跡から、アタック位置を推定する手法として線形近似を用いる．一般にアタックのための助走は直線軌道であることから、トス動作判定までの数フレーム分の選手位置からアタック位置予測線を算出し、打点位置予測を行う．

5.3.2 クイック攻撃における実験

実際の練習映像を用いて、本手法のアタック位置予測精度を検証した．2016年に行われた全日本女子チームの合宿練習において、ブロックマシンを使用して行われたアタック練習時に撮影された動画を用いた．計8日間に渡って撮影された動画を事前にアタックシーンのみ手動で抽出した後、アタック種類毎に1つの動画ファイルにまとめた．動画内の練習では、2名のセッターと3名のアタッカーによる練習内容が含まれていた．体育館2階コート後方から商用カメラ (Sony 社製, HDR-CX530V) により俯角をつけて撮影した動画 (1920 × 1080 pixel, 30 fps) を OpenPose での処理のために変換し (1280 × 720 pixel, 15 fps)、オフライン処理で実験を行なった．

トス動作認識時からNフレーム前のアタッカー位置軌跡を用いて最小二乗法により線形近似を行い、アタック位置をセンターラインからL cmとした時の、実際のアタック位置 (真値) との比較検証を行なった．予測に使用したフレーム数Nは3-8フレーム、センターラインからの距離Lは0-100 cm内を10 cm毎に算出した．バレーボールにおけるクイック攻撃は大きく5つに分類することができる (Fig. 5.4)．大きくセッターとアタッカーの位置関係と距離によって名称が異なり、セッターから左側へ近い

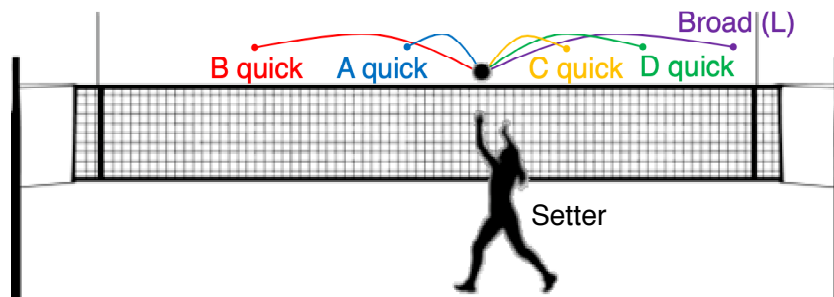


Fig. 5.4: クイック攻撃の種別

ところで打たれるアタックがAクイック, Aクイックよりもさらに外側で打たれるアタックがBクイック, セッターから右側へ近いところで打たれるアタックがCクイック, Bクイックよりもさらに外側で打たれるアタックがDクイック, Dクイックよりもさらに外側で打たれるアタックがブロードLとなる. それぞれの攻撃において, トスの質やアタッカーの助走の軌跡が大きく異なることが観測されたため, A,B,C,Dクイックとブロード(L)のそれぞれ5つに分けて予測値と真値の誤差を検証した. なお真値は, トス動作認識以降のフレームもOpenPoseによる認識を行い, 目視によりアタック動作までフレームを進め, アタック動作の時刻におけるアタッカーの重心の位置(両尻の midpoint)を手動で求めた.

認識されたシーンは, Aクイック150シーン, Bクイック125シーン, Cクイック68シーン, Dクイック87シーン, ブロード(L)71シーンであった. アタック種類毎の時間余裕をFig. 5.5に示す. 全てのアタック種類において, 平均の時間余裕が600ms以上であることがわかる.

代表的な例として, フレーム数Nを3,4,5フレーム(トス動作認識前133, 200, 267ms前までの助走軌跡)を用いた線形近似による予測線の例をFig. 5.6に示し, 予測値(p_i)と真値(t_i)との二乗平均平方根(RMS, 5.4式)をFig. 5.7に示す.

$$RMS_{A,B,C,D,L} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - t_i)^2} \quad (5.4)$$

また本手法の評価指標として, ブロックマシンの単体幅の半分以内に予測値が収まっている($|p_i - t_i| < \text{マシン幅の半分}$)確率を予測成功率として定義する. これは, 実際にマシンを自動で動作させたときに, アタッカーの目の前のアタックコースをマシ

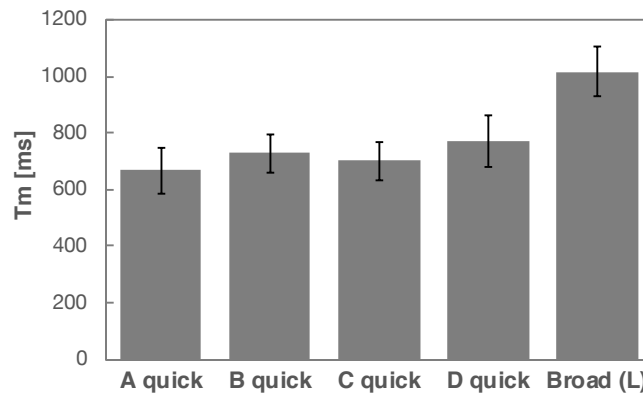


Fig. 5.5: クイック攻撃における時間余裕

ンが遮ることのできる確率を意味している。フレーム数 N を 3,4,5 フレームを用いた線形近似における予測成功率を Fig. 5.8 に示す。また、クイック攻撃においてもマシン 2 体によるブロックが行われることもあるため、ブロックマシンの単体幅に収まっている確率も同様に Fig. 5.9 に示す。

5.3.3 考察

アタック位置予測精度について考察する。A,B クイックについては、Fig. 5.7 より、3-5 フレームを用いた線形近似におけるアタック位置 40-60 cm の RMS が 20-30 cm であり、小さい誤差でアタック位置を予測可能であることがわかった。予測成功率に関しても、Fig. 5.8 より、A クイックで 70-80 %、B クイックで 70 % 前後であり、高い確率でアタック位置にマシンによるブロックを提示できることが示唆された。これは A,B クイックでは特に、トスからアタックまでの早さが重要となる攻撃手法であるため、アタッカーは助走の勢いを保ちながらジャンプからアタックへスムーズに動作していることが起因していると考えられる。そのためにアタッカーの助走は概ね直線軌跡となり、本手法が有効であったといえる。

4.2.9 項でも説明した通り、これまでのブロックマシンを用いた実際の練習では、コーチによるタブレット PC 手動操作のアタック位置とブロック位置が一致する確率が 60-70 % と報告されている。よって、本手法は A,B クイックにおいて、手動操作以上の精度でブロックを提示できるといえる。また Fig. 5.9 より、マシン 2 体分の予測成功率は 90 % 以上と非常に高い数値であることがわかり、マシン 2 体によるブロックにおいてはアタックのほとんどのシーンに対して有効にブロック形態を提示できることが示された。さらに、手動操作ではタブレットの操作にコーチ 1 人分のリソースを占有するため、予測精度が手動と同等程度でも練習現場の人員不足を解決するために有効であるといえる。

一方で C,D クイック、およびブロード L については、Fig. 5.7 より、3-5 フレームを用いた線形近似におけるアタック位置 40-60 cm の RMS が 1 m 以上であり、予測成功率に関しても、Fig. 5.8 より、20 % 以下であり、十分な予測精度が得られなかった。また Fig. 5.9 より、マシン 2 体分の予測成功率は 20-30 % 前後であり、マシン 2 体分によるブロックにおいても有効なブロック形態を提示できないことが示された。C,D クイック、およびブロード L が A,B クイックと大きく異なる点として大きく 2 点考えられる。1 点目は、助走軌道がセンターラインに対して斜め方向であることから、線型近似による予測線の傾きが大きくなり、センターラインからの距離によるアタック位置予測の偏差が大きくなる傾向が考えられる。2 点目はトス動作認識後に助走軌道の傾きが大きく変化することであり、特に早さが重要となる A,B クイックと比較して、

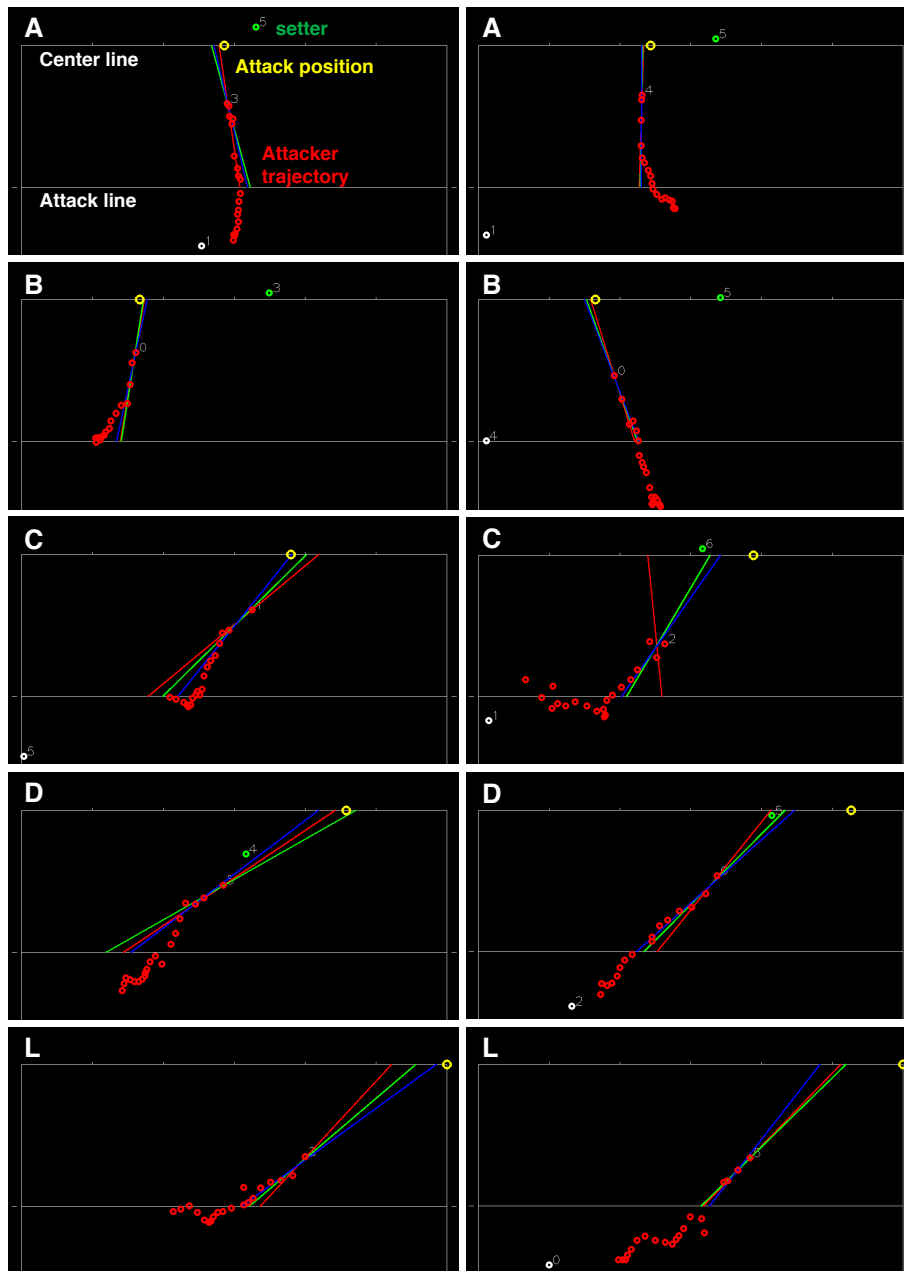


Fig. 5.6: アタック位置予測の例示 (赤丸: アタッカーの軌跡 20 点, 緑丸: トス動作認識時のセッターの位置, 黄色丸: 実際のアタック位置, 赤線: 3 点近似予測線, 緑線: 4 点近似予測線, 青線: 5 点近似予測線)

5.3 選手位置軌跡を用いたアタック位置予測

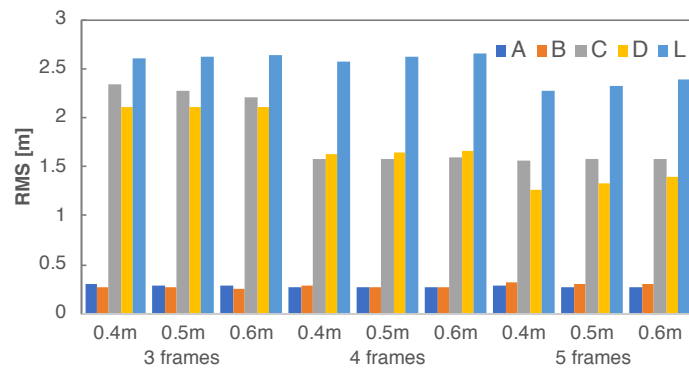


Fig. 5.7: アタック位置予測の誤差 RMS

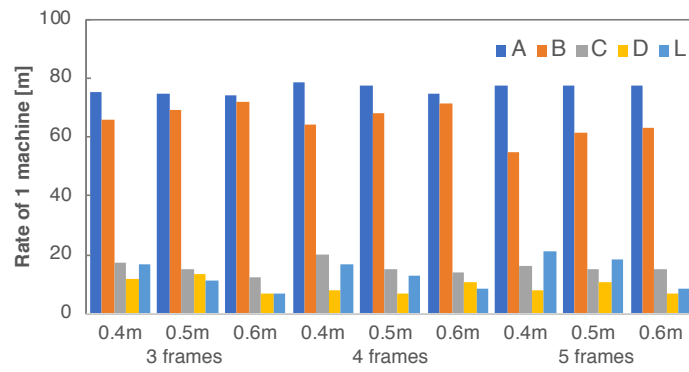


Fig. 5.8: 予測成功率 (マシン 1 体分)

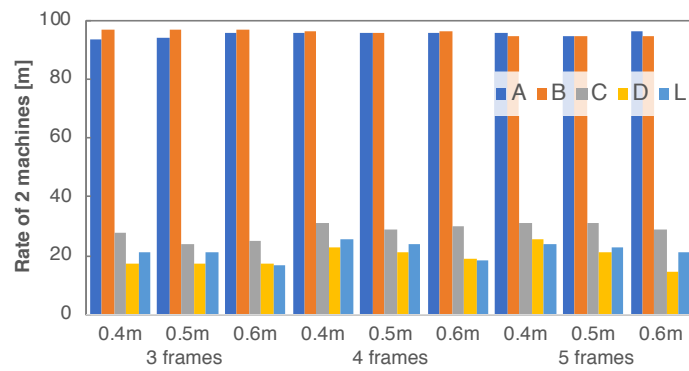


Fig. 5.9: 予測成功率 (マシン 2 体分)

相手のブロッカーにアタック位置を予測されないように“騙す”動きが含まれることが考えられる。

女子選手に対して、A,B クイックにおける十分なアタック位置予測精度が示されたが、ブロックマシンは男子選手にも使用されるため、男子チームの練習においても同様の手法でアタック位置予測精度を検証した。

2018年に行われた全日本男子チームの合宿練習において行われたアタック練習時に撮影された動画を用いた。計2日間に渡って撮影された動画を事前にアタックシーンのみ手動で抽出した後、アタック種類毎に1つの動画ファイルにまとめた。女子チームと異なり、男子チームではA,B クイックのみの攻撃シーンであった。

認識されたシーンは、A クイック 28 シーン、B クイック 26 シーンであった。またそれぞれ時間余裕は、A クイックが平均 772 ms(SD=74 ms)、B クイックが平均 649 ms(SD=90 ms)であった。両アタックとも、平均の時間余裕が 600 ms 以上であるため、ブロックマシン動作のための時間間隔を確保できている。

代表的な例として、フレーム数 N を 5,6,7 フレーム(トス動作認識前 267, 333, 400 ms 前までの助走軌跡)を用いた線型近似による二乗平均平方根を Fig. 5.10 に、マシン1体分の予測成功率を Fig. 5.11 に、マシン2体分の予測成功率を Fig. 5.12 にそれぞれ示す。

A,B クイックについては、Fig. 5.10 より、女子選手の結果と同等に、小さい誤差でアタック位置を予測可能であることがわかった。予測成功率に関しても、Fig. 5.11 より、安定して 60 %前後であり、高い確率でアタック位置にマシンによるブロックを提示できることが示唆された。また、Fig. 5.12 より、マシン2体分の予測成功率は安定して 80 %以上と非常に高い数値であることがわかり、女子と比較して男子ではクイック攻撃において2枚ブロックとなるシーンが多く観測されることから、特に有効であるといえる。

以下、本項についてまとめて考察する。本項ではクイック攻撃に着目し、セッターのトス動作とアタッカーの走り込み動作軌跡からアタック位置を約 600 ms 前に予測する手法を提案し、その精度の検証を行なった。クイック攻撃の中でも、A,B クイックに対して本手法は有効であることが示され、練習現場におけるコーチによる手動操作よりも精度の高いブロック形態が提示可能であることが示唆された。一方でC,D クイックおよびブロードLに関しては、別の予測アルゴリズムが必要であることが明らかとなった。トス動作時のセッターとの位置関係など、他変数も考慮した予測手法や多次元近似、確率的手法を用いた予測手法を今後検討する。

また、今回提案した手法は単眼映像からの選手位置推定であるため、練習映像や試合映像などの一般的な映像資料からデータセットを収集することが可能となる。今後の大量の学習データを収集し活用することで、機械学習 [70] などの手法による、より

5.3 選手位置軌跡を用いたアタック位置予測

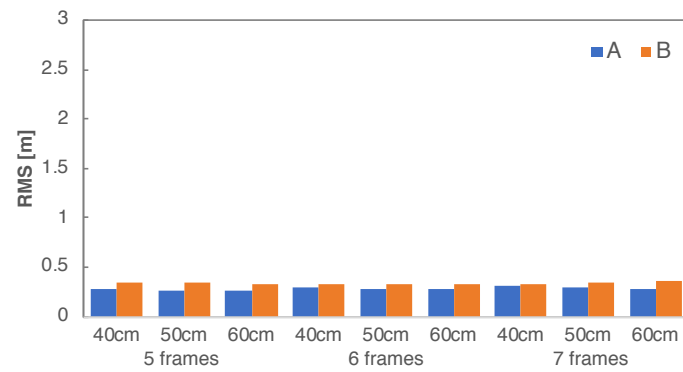


Fig. 5.10: アタック位置予測の誤差 RMS

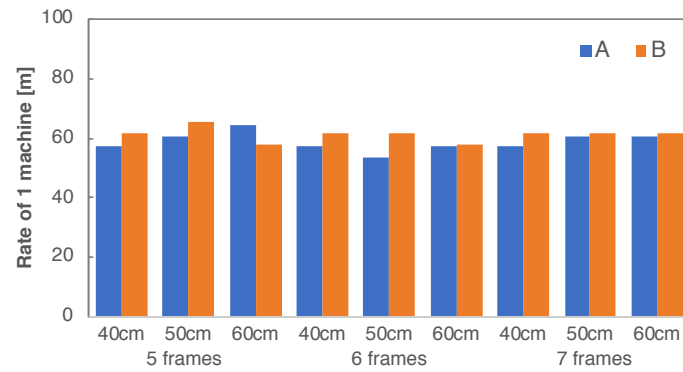


Fig. 5.11: 予測成功率 (マシン 1 体分)

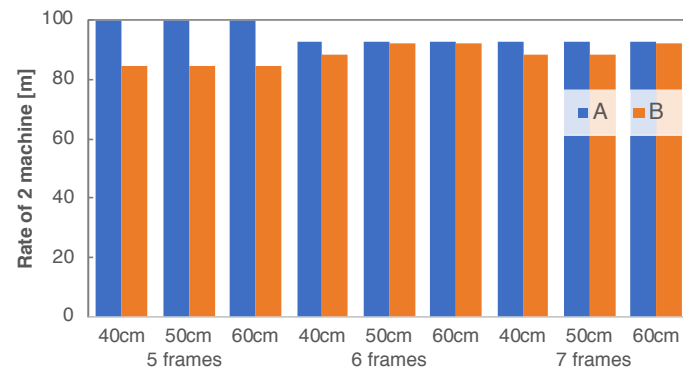


Fig. 5.12: 予測成功率 (マシン 2 体分)

精度の高い予測手法を構築することが可能となる。使用を重ねる毎にアタック位置予測精度が向上していくシステムが構築され、アタック練習としての有効性が向上していくだろう。

5.4 トス軌跡を用いたアタック位置予測

これまでに OpenPose の手法を用いて、コート上の選手位置をリアルタイムに推定し、クイック攻撃に対応したアタック位置予測手法を提案した。一方でバレーボールの試合において多く用いられる攻撃手法であるサイド攻撃に関しては、アタッカーの助走軌跡のみでアタック位置を予測することは困難である。なぜならサイド攻撃では、クイック攻撃と比較してセッターとアタッカーとの距離があり、先述したトス動作 (Fig. 5.3) 認識時においてアタッカーの十分な助走軌跡を得られないためである。そこでセッターによるトス後のボール位置推定を行い、トス軌道予測および落下点位置予測からアタック位置を予測する手法を提案する。

5.4.1 ボール位置推定手法

ボールの位置予測手法として、画像認識用ニューラルネットワークである YOLO[68] を用いる。YOLO は認識速度に特化しており、例えば 800×800 画素の画像において約 30 fps での物体認識が可能である。2 画像を用いて各画像内におけるボール画像座標を YOLO により取得し、事前に算出された各カメラパラメータより 3 次元位置を推定する。

YOLO のオリジナルデータ学習のため、ブロックマシンが実際に使用される練習現場において撮影された動画から、セッターによるトス前後のシーンのみ抽出し、各フレーム毎に画像ファイルとして取得する。各画像ファイルに対して、バレーボール領域のみ手動で画像座標を指定し、これらのデータを約 2,000 枚収集し教師データとして学習させた。なおイテレーション数は 15,000 とした。

オリジナルデータを用いたボールの認識結果として、学習に使用していないシーンにおける適用結果の例を Fig. 5.13 に示す。桃色で "ball" と表示された領域が YOLO によって抽出されたボール領域である。トス前後のシーンではボールの速度が早く、ボール領域周辺ではブラーが生じる画像が多くなるが [71]、全てのシーンにおいてボール領域が認識されることが確認された。

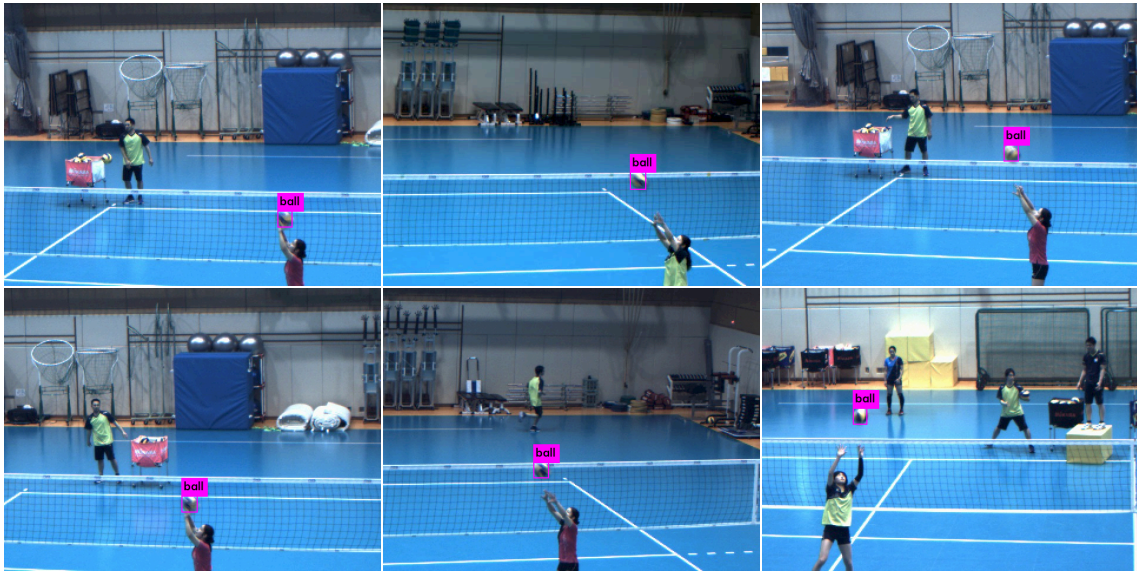


Fig. 5.13: YOLO を用いたボール領域の推定

5.4.2 位置推定精度実験

事前にバレーボールコートにおける既知の特徴点を用いて各カメラパラメータを算出し、2画像における同一対応点から3次元位置を推定する。なおキャリブレーションに用いた既知点は、エンドライン後方に配置したカメラ視点から、両サイドラインと手前アタックライン・センターライン・奥アタックライン・奥エンドラインの交点の8点、および両アンテナとネット上端・下端の4点、計12点を用いた。なおカメラ間距離は約6mとし、センターラインから約12.5m離れた高さ約7.7mの位置に俯角をつけてカメラを設置した。カメラはPointGray社製のGrassHopper3(解像度2048×2048 pixel)に画角50.3 degのレンズを取り付けたものを使用した。

2画像を用いた3次元位置推定誤差を検証するため、バレーボールコート上に既知点マーカを設置し、推定値と真値を比較した。バレーボールコート(9×9m)を3mのグリッドに分割し、グリッド交点においてそれぞれ0, 1, 2, 3, 4mの位置に既知点マーカを設置し、2画像における各マーカを手動で画像座標を指定した。

2画像の画像座標対から各カメラパラメータを用いて3次元位置推定を行い、既知座標との3次元位置推定誤差を算出した(Fig. 5.14)。なお画角の関係上、取得できた3次元位置が限られているが、セッターによるトス後のボールを追跡するために十分な範囲は確保されている。各高さにおけるグリッド交点の既知座標と推定位置の距離を示しており、赤字で示した地点は100mm以上の誤差が計測された地点である。結果として概ね100mm以内の計測誤差であり、バレーボールの直径が210mmである

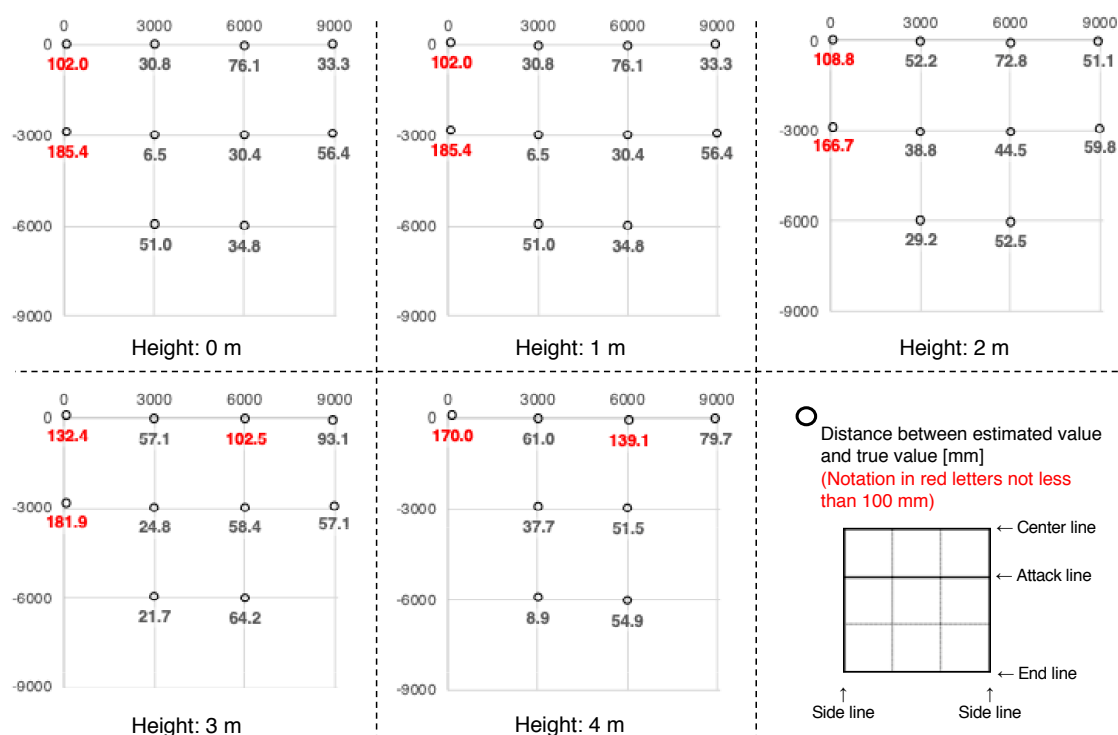


Fig. 5.14: 3 次元位置推定誤差

ことからボールの半径以内に収まっており、トス軌道を予測するにあたって十分な予測精度を有しているといえる。特にセッターがトス動作を行う代表的な地点においては 50 mm 前後の推定結果である。

5.4.3 トス軌道予測モデル

セッターによるトス後のボール位置推定からトス軌道予測を行い、落下点位置を予測するためにカルマンフィルタを用いる。先行研究としてカルマンフィルタを用いたバドミントンのシャトルの軌道推定の手法 [72] が提案されており、バドミントンのシャトルと同様にバレーボールのボールも放物運動となることから適用可能であると考えられる。

状態変数をボールの 3 次元位置，速度，加速度とし，観測値を 5.4.1 項で説明したボールの 3 次元位置とすると，フレーム k におけるボールの状態変数 X_k は，ボール

の3次元位置，速度，加速度を用いて，

$$X_k = \{x_k, \dot{x}_k, \ddot{x}_k, y_k, \dot{y}_k, \ddot{y}_k, z_k, \dot{z}_k, \ddot{z}_k\} \quad (5.5)$$

と表される．なおここでセンターラインと左側サイドラインの交点を原点とし，センターライン右側方向をx軸，鉛直上向き方向をy軸，サイドライン手前方向をz軸とする座標系とする．また，カルマンフィルタの状態モデルは，

$$X_k = AX_{k-1} + Bu_k + \omega_k \quad (5.6)$$

で表される．なお A は状態遷移行列であり，ボールは空気抵抗をうける斜方投射の運動であるため，

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \delta_t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \delta_t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{c}{m}\delta_t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \delta_t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \delta_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{c}{m}\delta_t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \delta_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \delta_t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{c}{m}\delta_t & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

と表される．なお， δ_t はフレーム間の時間差， Bu_k は状態遷移にかかる制御入力， m はボールの質量 (0.23 kg)， c は空気抵抗量である．また， ω_k はガウス分布からなるプロセスノイズである．重力加速度 g は制御入力によって表される．

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

ここで，観測モデルは

$$z_k = HX_k + v_k \quad (5.9)$$

と表される．なお v_k はランダムノイズであり， H は

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

とする．

5.4.4 実験

カルマンフィルタを用いたトス軌道推定，落下点予測の精度検証実験を行なった．実験環境の様子を Fig. 5.15 に示す．バレーボール経験者1名をセッターとし，通常のセッターの定位置である左側サイドラインから約5 mのコート位置に立たせた．サイド攻撃を対象としたトス軌道推定を行うため，レフト側にセッターから約5 m，ライト側にセッターから約4 m離れた位置に目標となるアタック選手の実験協力者を立た

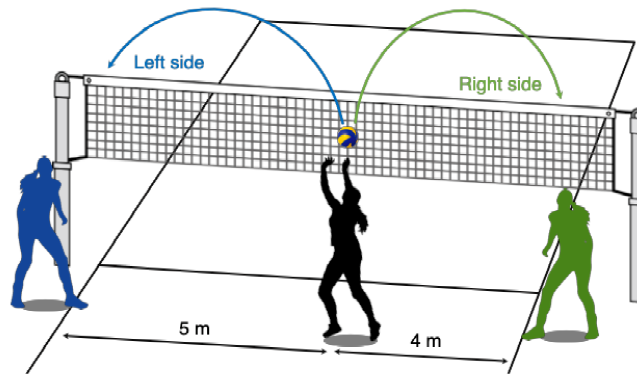


Fig. 5.15: 予測精度実験環境

せた．レフト，ライト側にそれぞれ 20 球ずつトスをさせ，この時におけるボールの 3 次元位置を先述した手法を用いて推定するとともに，トス後の 5 フレーム分，および 10 フレーム分のボールの軌跡によるカルマンフィルタの位置推定，落下点予測を行なった．なおフレームレートは 30 fps であった．

推定されたトス軌道の例を Fig. 5.16 に示す．レフト側，ライト側ともに十分にトス軌跡を取得できていることがわかる．各方向に分けて，トス後の 5 フレーム分，10 フレーム分のボール軌跡を用いたカルマンフィルタの予測を行い，トス軌道を予測するとともに，その軌道上における高さ 2.5 m(女子選手における平均的なアタック高さ)に最も近いフレームにおける予測値と真値を比較した．Fig. 5.17 に誤差の平均と標準誤差を示す．

5.4.5 考察

Fig. 5.17 より，トス後の 5 フレーム分を使用したアタック位置予測において，レフト側，ライト側ともに平均誤差は約 0.2 m であり，10 フレーム分を使用したアタック位置予測においては，レフト側，ライト側ともに平均誤差は約 0.1 m の結果となった．ブロックマシンのマシン単体の横幅が約 0.52 m であり，特にサイド攻撃においては 2 枚ブロックが一般的であるため，マシン 1 体分の横幅以内に収まっている予測精度は十分に高いといえる．

またトス後の 5,10 フレーム分は，30 fps での処理速度下ではそれぞれ 167 ms, 333 ms の所要時間であり，十分な時間余裕であるといえる．セッターによりボールがト

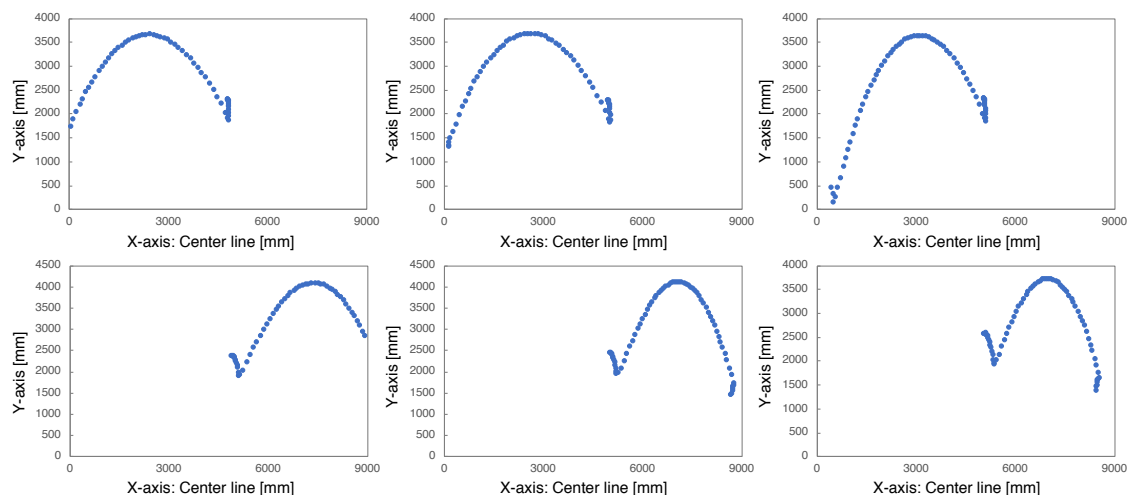


Fig. 5.16: 推定されたトス軌道例 (上段；レフト側，下段：ライト側)

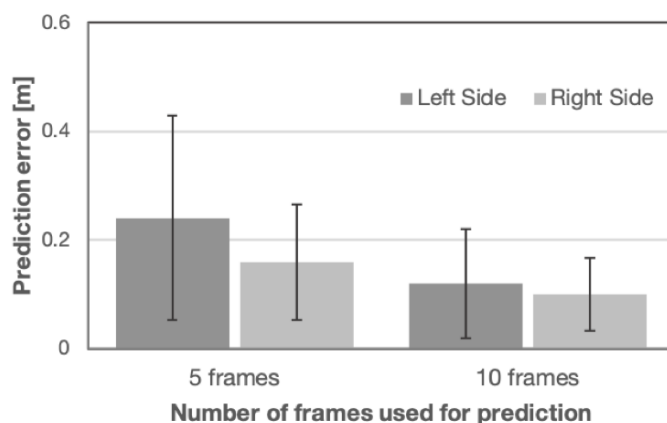


Fig. 5.17: トス落下点予測精度

スされてから、アタッカーによるアタックが行われるまでの時間間隔は、サイド攻撃においては早くても 1,100 ms であり、マシンの動作速度もこの要件に満たす性能を有しているが、数フレーム分を待機してから動作を開始する手法ではアタック時刻までにブロック形態が完成しない。そこで、ボールがトスされたフレームにおいてマシンの動作を開始させ、落下点が予測されたのちにマシンの目標位置を更新する手法を採用することで、トスに応じてマシンが適切な位置でブロック形態を提示することが可能となる。このマシンの目標位置修正にかかる時間として、10 フレーム分の認識時間はマシンの最終ブロック位置に大きな影響を及ぼさないため、本手法は有効であると言える。

以下、次節ではこれまで説明した、クイック攻撃、およびサイド攻撃におけるアタック位置予測をリアルタイムで行い、実際にマシンの動作へ反映させたときの有効性について説明する。

5.5 ブロックマシンとの統合実験

リアルタイムにアタック位置を予測する自動制御システムは、カメラ 2 台 (PointGray 社製, GrassHopper3) と認識用 PC (NEXTGEAR-NOTE i71130SA1, Core i7-8700, [SLI] GeForce GTX 1080) から構成される。カメラ 2 台はコート後方、2 階キャットウォークに設置しており、ブロックマシン制御用 PC との距離があるため、認識用 PC-制御用 PC 間は無線ルータを介して TCP/IP 通信により相互の情報伝送を行なった。OpenPose の手法は単眼で約 25 fps, YOLO の手法は両眼で約 30 fps であった。

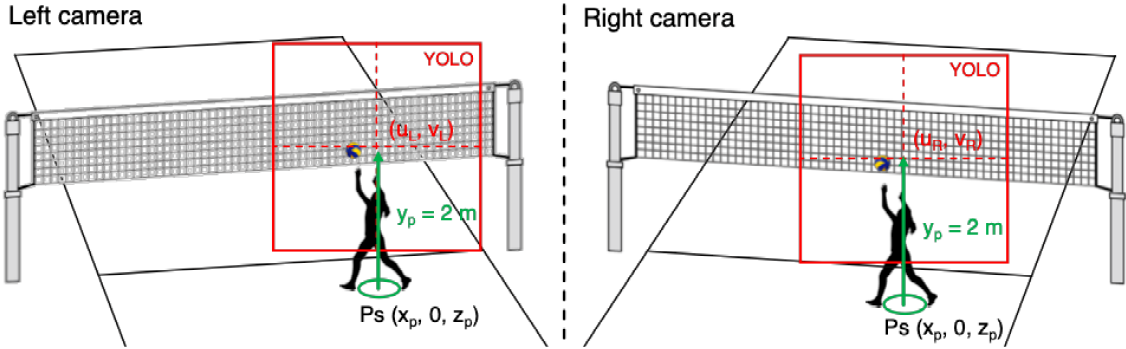


Fig. 5.18: ボール領域探索のための初期範囲

クイック攻撃におけるアタック位置予測に関しては、セッター選手のトス動作認識とアタッカー選手の助走軌跡の情報が必要であり、OpenPose の手法による認識のみとなる。一方でサイド攻撃においては、セッター選手のトス動作認識後、ボール位置推定が必要であり、OpenPose から YOLO の手法に切り替える必要がある。なお、処理速度の関係上、両者を同時に認識させることは困難である。また、OpenPose の認識範囲は手前コート全域を覆うことは可能であるが、YOLO は認識範囲が限定される。これは、入力画像に対するボール領域が小さいため、YOLO によって認識を行う画像の領域が大きい場合、ボール位置が正確に推定されないためである。そのため本研究では YOLO の認識範囲を 800×800 pixel としている。そこで OpenPose によるトス動作認識後、セッター選手の位置 $P_s(x_p, 0, z_p)$ の高さ 2 m の位置 $P_s(x_p, y_p(= 2m), z_p)$ を YOLO の認識範囲の中心となるよう、5.11 式、5.12 式により各カメラにおける画像座標を算出する (Fig. 5.18)。Fig. 5.18 の赤枠が YOLO の初期フレームの部分領域を表しており、ボール領域が認識されたのちは、ボール位置が中心となるよう部分領域を移動させて追跡する。この手法により、コート全体をカバーする認識範囲となるだけでなく、トス時のセッター選手周辺の部分領域探索となるため、練習映像における認識の難点である、コートに点在している他のボールを誤って認識する確率を下げる事が可能となる。

$$s_L \begin{bmatrix} u_L \\ v_L \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{Lx} & 0 & c_{Lx} \\ 0 & f_{Ly} & c_{Ly} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{L1} & r_{L12} & r_{L13} & t_{L1} \\ r_{L21} & r_{L22} & r_{L23} & t_{L2} \\ r_{L31} & r_{L32} & r_{L33} & t_{L3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

$$s_R \begin{bmatrix} u_R \\ v_R \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{R_x} & 0 & c_{R_x} \\ 0 & f_{R_y} & c_{R_y} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{R_1} & r_{R_{12}} & r_{R_{13}} & t_{R_1} \\ r_{R_{21}} & r_{R_{22}} & r_{R_{23}} & t_{R_2} \\ r_{R_{31}} & r_{R_{32}} & r_{R_{33}} & t_{R_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

5.5.1 実験

ブロックマシンが設置されている NTC において、自動制御システムとブロックマシンシステムを統合し、バレーボール経験者 2 名による実験を行なった。なお、5.4.4 項で説明したトス軌道予測実験とは環境が異なる。練習場の環境により、センターラインから約 18 m 離れた高さ約 6.1 m の位置に俯角をつけてカメラを設置した。カメラ間距離は同様に約 6 m、キャリブレーションに使用した点も同様に 12 点とした。

まず、クイック攻撃に関して実験を行なった。セッターのトス動作認識時にアタッカーの助走軌跡からアタック位置を予測し、その信号(動作開始指令, アタック位置)を認識用 PC から制御用 PC へ送り、アタック位置に応じてマシンが自動でブロック動作を開始する。A,B,C クイックにおけるマシンの自動動作の様子を Fig. 5.19 に示す。概ねアタック時刻にてブロック形態が完成しており、アタッカーの位置にブロック動作が行われることが確認された。アタックのタイミングにマシンのブロック動作が間に合わない、といった問題点は表出せず、速さのあるクイック攻撃においても十分なブロック形態提示能力を有していることが示された。

続いて、サイド攻撃に関して実験を行なった。セッターのトス後に信号(動作開始指令)を、その 10 フレーム後に信号(カルマンフィルタにより予測されるアタック位置)をそれぞれのタイミングで認識用 PC から制御用 PC へ送り、アタック位置に応じてマシンが自動でブロック動作を開始する。本アルゴリズムをブロックマシンシステムへ実装し、実証実験を行なったところ、狙った動作が行われなかった。原因として、10 フレーム分の時間間隔でマシンの可変移動距離が 1 m 以内になってしまうこと(約 2 m の移動距離の短縮が望ましい)、またマシンの制御手法として移動距離の途中変更が困難であったことなどがあげられる。

そこで、トス後の数フレームを用いたカルマンフィルタによる予測位置補正から、トス後の 2 フレームのみを用いてボールの初速ベクトルからのトス軌道予測手法を新たに構築した。ボールの初期位置と初速ベクトルを用いて、媒介変数表示によりトス軌道は 5.13 式で表される。なお、 m はボールの質量 (0.23 kg)、 k は空気抵抗係数

(0.05) で実験的に算出した数値を用いた.

$$\begin{aligned} x_t &= \frac{mv_{x0}}{k}(1 - e^{-\frac{k}{m}t}) + x_0 \\ y_t &= \frac{m}{k}\{(v_{y0} + \frac{mg}{k})(1 - e^{-\frac{k}{m}t}) - gt\} + y_0 \\ z_t &= \frac{mv_{z0}}{k}(1 - e^{-\frac{k}{m}t}) + z_0 \end{aligned} \quad (5.13)$$

Fig. 5.20 にサイド攻撃 (レフト側) におけるマシンの自動動作の様子を示す. 概ねアタック時刻にてブロック形態が完成しており, アタッカーの位置にブロック動作が行われることが確認された. 特に Fig. 5.20(下) のように, トスが短くなった時 (アンテ

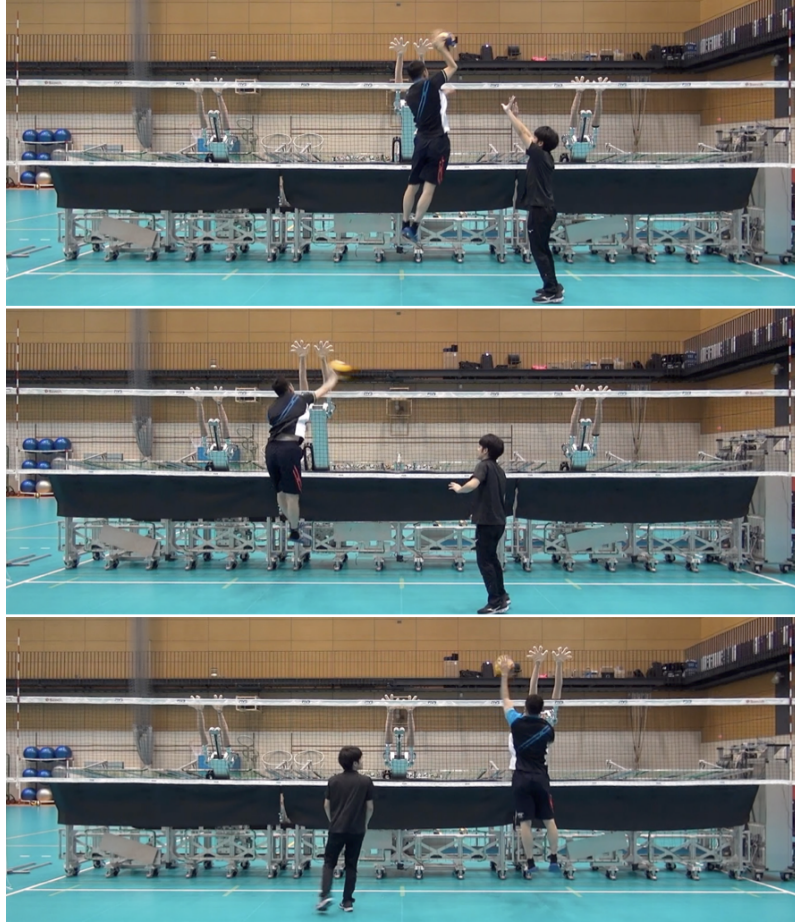


Fig. 5.19: クイック攻撃に対するマシン自動動作 (上: A クイック, 中: B クイック, 下: C クイック)



Fig. 5.20: サイド攻撃に対するマシン自動動作 (上：通常のサイド攻撃，下：トスが短くなったサイド攻撃)

ナから内側に約2 m), マシンがその分ネット中央側に寄ってブロック形態を提示していることがわかる。サイド攻撃においても十分なブロック形態提示能力を有していることが示された。

5.5.2 考察

クイック攻撃、サイド攻撃ともに自動制御システムとブロックマシンシステムの統合により、自動でプレーを認識し、自動でマシンがブロック動作を行うシステムを構築し、その有効性を検証した。

一方で、クイック攻撃に対する実践上における問題点が表出した。本手法によるアタック位置予測は、アタッカーの重心位置(正確には両足首の中点)を用いているため、予測される位置もアタッカーの重心位置となる。しかし実際にマシンがブロックすべき位置はボールの位置が一般的であるため、マシン位置とボール位置の関係に誤差が生じる場合がある。つまり右利きの選手であれば選手の重心の位置よりも右側に、左利きの選手であれば選手の重心の位置よりも左側に、それぞれ30 cm 前後(この数値も選手の個人差によって大きく異なる)寄ることとなる。Fig. 5.19(上)やFig. 5.19(中)

では右側に、Fig. 5.19(下)では左側に、アタッカーの肩幅の半分の距離を変更すべきである。今後の展望として、アタッカーの助走動作から選手の利き腕を推定し、アタック位置予測を補正する手法を構築する必要がある。

またサイド攻撃に関しても実践上の問題点が表出した。トス速度が速く、ボールが一直線にセッターからアタッカーへ向かう平行トスでは、高さ指定によるアタック位置予測に誤差が大きく生じることがわかった。本手法では、トスの初速からトス軌道を推定した後、アタック位置に関しては高さ 2.5 m の位置としている。しかし平行トスでは高さ変化が小さいため、多少の軌道の推定誤差が大きなアタック位置予測誤差の原因となる。今後の展望として、トス軌道だけでなくもう 1 台の PC を追加して、サイド攻撃に関してもアタッカーの助走軌道も考慮してアタック位置予測の精度を向上させる手法を構築する必要がある。

5.6 本章のまとめ

本章で説明したリアルタイムトラッキングによる自動制御システムについてまとめて考察し、本章のまとめとする。

ブロックマシンシステムのアタック位置とブロック位置の誤差によるトレーニング効率低下の懸念をうけて、自動でアタック位置を予測し、マシンが自動でブロック動作を行うことを目的としたシステムとして、システムの設計、構築、評価をした。特にクイック攻撃とサイド攻撃に着目し、選手位置推定とボール位置推定によるハイブリッドなアタック位置推定手法を提案し、ブロックマシンシステムとの統合実験によりその有効性を示すとともに、問題点を整理した。

ここで、ブロックマシンが自動で動作することの利点について考察する。これまで説明した通り、アタック位置とブロック位置の誤差を手動操作と比較して小さくすることが可能となり、アタッカーはより自身の周辺状況の把握とプレーの判断を早く、適切に行うスキルが求められる。こういった、より実際の試合に近い状況を日常の練習から組み込み、体感することにより、オープンスキル向上のための貢献へと繋がると考えられる。

また、ブロックマシンシステムのこれまでの手動操作では、タブレット PC 操作のためにコーチや指導者などの現場での 1 人分のリソースを占有するが、自動化を組み込むことでそのリソースが解放され、他の指導に手を割くことが可能となる。実際、代表チームにおけるヒアリングからもこういった意見が表出していることから、スポーツ現場における人手不足の問題は本システムのような機械で代替していく必要性がでてくると考えられる。また、これまではチームの公式練習におけるシチュエーションを想定しているが、例えば公式練習前後の個人練習では練習相手がいらないこと

が多い。上記の状況においても、ブロックマシンシステムが自動で認識・動作を行うことで、個人練習においても多様な練習相手を想定することが可能となり、オープンスキルのトレーニング手法を確立できるといえる。

さらに、ブロックマシンシステムの手動操作では、ブロック動作の能力にタブレットPC操作者のスキルや認知・操作ノイズが含まれているが、これによりアタッカーの能力を測ることが困難となる。一方で、システム側が自動で予測・動作を行うことで、マシンによるブロック動作を定量値と見なすことができ、それに対するアタッカーの能力変化が観測されやすくなるだけでなく、アンダーカテゴリなどへのレベル設定が容易になると考えられる。

これまでブロックマシンシステムが自動化されることによる利点について説明したが、一方で自動制御システムに残された課題も考慮した練習メニューを組み込んでいく必要がある。本研究で提案した自動化システムは、アタック位置に対して正面にブロkkerが位置するように動作することを狙いとしている。しかし、実際の試合を考慮した練習をする上で、ブロkkerの後ろのコート状況(ブロkkerの余りや背後のレシーバーなど)との連携によって総合的な守備体系を再現する必要がある。あるシーンではストレートのコースを遮るようなブロック形態を、またあるシーンではブロック間をあけるブロック形態を、といった具体的な練習意図に沿ったブロック形態を提示するためには、人間の介入が必ず必要となる。例えばタブレットPCによる手動操作では、上記のコースを限定させるブロック形態を任意にシステムに反映させることが可能である。手動操作が得意な点、自動動作が得意な点を現場の指導者がその利点を把握できるようにし、練習メニューの組み立てとして有効にトレーニングに活用されることが重要であると考えられる。

第6章 考察

本章ではスポーツ科学に関する先行研究を概観するとともに，練習現場における実践的要求をシステムデザインを通じて構築した結果として，3-5章から得られた知見について整理する．また本研究の人間情報学への貢献を述べるとともに，インタラクティブなトレーニングシステムを実際の練習現場で使用してもらうためのシステム構築について考察する．最後に今後の展望について述べ，本研究により得られた知見の他のスポーツ種目への適用について考察する．

6.1 スポーツ科学

1.1章にて先述した通り，スポーツ分野における運動スキルの分類手法として，クローズドスキルとオープンスキルに分類することができる．中でもオープンスキルは外的要因に左右される状況下で発揮される技術であるため，高い認知スキルが要求される．競技者は絶えず変化する複雑な環境下で，素早く状況把握をし，的確な判断のもと行動を起こす必要がある．スポーツにおいて重要となる視覚機能のことはスポーツビジョンといわれている [73]．スポーツビジョンは広義には「スポーツと視覚および視覚器に関する研究」である．特にバレーボールは他の球技スポーツと比較すると，競技場の大きさを選手人数で割った指標である，選手1人当たりの競技面積が圧倒的に小さい (Fig. 6.1)．つまりコート内に選手が密集しており，その空いたスペースにボールを打ち込む必要があるため，相手コートを瞬時に状況把握するスポーツビジョン能力が必須といえる．例えば，日本国内のバレーボールリーグ (Vリーグ) の選手と大学女子選手のスポーツビジョン能力を比較した結果，眼球運動や眼と手の協調運動 (詳細は後述) において，Vリーグ選手群が優位に優れていたと報告されている [74]．

近年のスポーツビジョンに関する研究として，熟練者と非熟練者の眼球運動の違いが様々な競技において明らかにされている [75]．眼球運動は主に眼球運動記録装置を用いて，競技中の選手の視線配置や視線停留時間，視線配置パターンなどが計測され，定量値として視覚機能が評価される．例えばテニスのサーブレシーブにおいて，熟練者はサーバーの腕やラケットへの視線の配置が多いが，初心者はボールや体幹への視線の配置が多いことが明らかにされている [76]．また他にも，サッカーのペナルティ

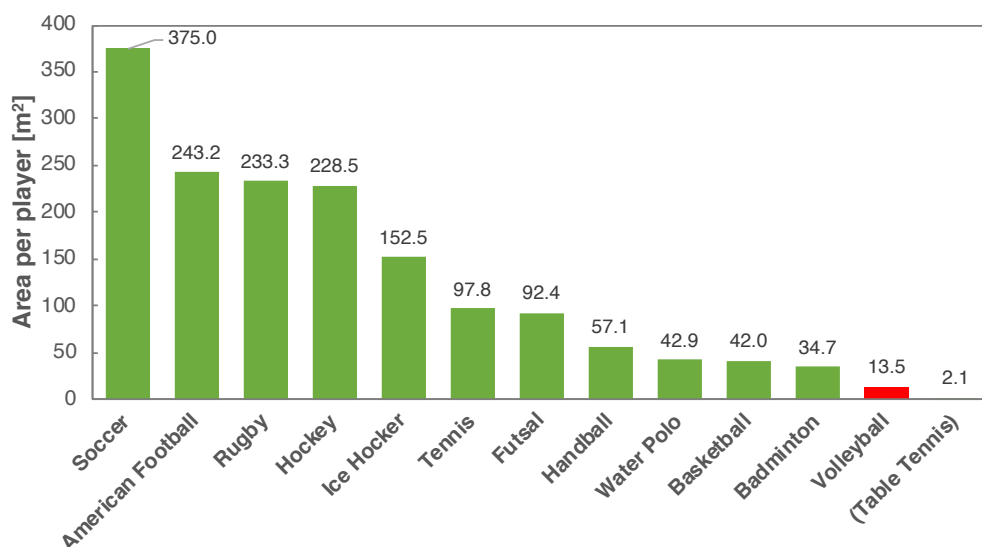


Fig. 6.1: 代表的な球技スポーツにおける選手1人辺りの面積(卓球はコート(台)内だけでなく、周辺領域も含むめてプレーするため参考値)

キック時におけるボールキーパーに関する研究 [77] やディフェンダーの視線配置と視線パターンに関する研究 [78], 野球の打撃時における打者の視覚探索に関する研究 [79] など、多岐にわたって行われている。

優れたパフォーマンスを発揮するためには、視覚機能を向上する必要があるとされているが、視覚システムはハードウェア的特性とソフトウェア的特性の2つに大別されている。ハードウェア的特性は静止視力や動体視力などの視覚的能力、ソフトウェア的特性は予測技能や視覚探索方略といった情報処理方策で表される。ハードウェア的特性を高める方法として、スポーツビジョン能力のトレーニングがあげられる。そのため、視覚システムのハードウェア的特性の向上と競技能力の向上に関する研究がこれまで行われている。スポーツビジョンにおけるハードウェア的特性の代表的な項目として、以下の8つが挙げられる。

1. 静止視力 (Static Visual Acuity : SVA)
2. 前後方向動体視力 (Kinetic Visual Acuity : KVA)
3. 横方向動体視力 (Dynamic Visual Acuity : DVA)
4. 深視力 (Depth Perception : DP)
5. コントラスト感度 (Contrast sensitivity : CS)

6. 眼球運動 (Ocular Motor Skill : OMS)

7. 瞬間視 (Visual Reaction Time : VRT)

8. 眼と手の協応運動 (Eye-Hand Coordination : E/H)

これまでに様々なスポーツ競技の先行研究において、スポーツビジョン能力とスポーツ競技力の関係性が議論されており [80], ハードウェア的特性としては特に動体視力 (KVA, DVA) と競技力に相関があることなどが明らかになっている。一方これまでの研究では、スポーツビジョン能力とスポーツ競技力の関係性を上級群-中級群 (-初級群) といった競技レベル分けによる優劣比較が多くみられる。しかし上級群内の選手間 (例えば代表選手間) での調査が行われている例は少なく、選手の特徴とスポーツビジョン能力の対応付けは困難である。また上級群の選手がさらに競技スキルを向上させるための、スポーツビジョン能力の具体的な訓練事項や手法などは明らかにされていない。さらに近年は、競技力は経験を通じて獲得されるソフトウェア的特性に依存する、という見解も見受けられる [81]。

ソフトウェア的特性における先行研究として、視覚配置パターンや状況予測において、熟練者と非熟練者の違いが明らかとなっている。例えばシーンの映像提示において、映像の一部時間区間を遮断する時間的遮断法や映像内の一部座標区間を遮断する空間的遮断法 [82] を用いて、相手選手の行動予測の手がかりとして熟練者が何を手がかりとしているか明らかにする手法が提案されている。つまり、視覚情報から有益な情報を抽出し、正確に予測することを可能とするスキルを明らかにすることができる。

視覚情報獲得スキルのソフトウェア特性であるパターン認識や状況予測スキルに関して、熟練者は、以下の知覚・認知的能力のソフトウェア的特性が優れていると報告されている [81]。

1. プレーのパターンをより早く正確に再認できる
2. パフォーマンスに関連する対象 (ex. ボール) を背景ディストラクション刺激の中より早く正確に検出することができる
3. より効率的な視覚的探索方略、より多くの視覚的手がかりを利用して相手の動きを予測する能力に優れる
4. 与えられた特定の状況下で次に何が起こるかの予測をより正確に行える

スポーツビジョン能力のハードウェア的特性として、動体視力や眼球運動などの高いスキルを有しつつ、各スポーツ競技における適切なソフトウェア的特性を獲得していることが重要となる。しかしバレーボール、特にアタックシーンに着目すると、ス

スポーツビジョン能力と競技力の関係について調査された研究はほとんど見受けられない。理由として、バレーボールのアタックシーンのように動作が大きいプレーにおいて眼球運動を計測することが困難であることが考えられる。また、対象選手(アタッカー)の身体動作により、視覚情報が大きく変化するため、身体動作に応じた映像提示は技術的に困難であることが考えられる。近年では、2.1節にて説明したVRシステムによる状況生成とインタラクティブなシーンの映像提示が可能となってきたため、今後、より詳細なスポーツビジョン能力と競技力の関係性が明らかになると考えられる。

ここで、本研究により得られた以下の知見をまとめると、オープンスキルにおけるスポーツビジョン能力(特にソフトウェア的特性)向上への寄与は以下のように考えられる。

第3章で説明したブロックボードより、最終ブロック形態が固定・事前に提示されている状況においても、実際の練習現場において有効なトレーニングシステムであることがわかった。これは自コート要因が変化する状況下におけるアタクトレーシングとして有効であったといえ、セッターからのトスを素早く認識し、落下点を予測し、アタッカーのアタック位置・打点高さと相手ブロッカー(ブロックボード)との位置関係を把握した上で、アタッカー自身の動作を遂行する必要があるためであると考えられる。特にトスの落下位置や質(速さや高さ)によってアタック位置が変化するため、相手コート要因が固定されている状況においても、周囲の状況を認識し、適切な行動選択が要求されるためである。

第4章で説明したブロックマシンより、初期位置・姿勢から動作を開始し、時間経過とともに動きが変化し、最終ブロック形態がアタック直前に完成することは、実際の試合状況を想定したシーン生成が可能であり、練習現場において有効なトレーニングシステムであることがわかった。ブロックボードにおける自コート要因だけでなく、相手コート要因も同時に変化する状況下におけるアタクトレーシングとして有効であったといえ、セッターからのトス、落下点予測、相手ブロッカー(ブロックマシン)の動きの認識、最終ブロック位置・姿勢の予測をした上で、アタッカー自身の動作を遂行する必要がある。練習現場におけるブロックマシンの継続使用により、選手のアタック内訳の結果に効果の示唆が示されたのは、視覚的なスキル向上への貢献であると考えられる。

ブロックマシンにおいて動作自由度を限定したことにより、マシンの初期位置から最終ブロック形態までの動作推移は実際のブロッカーとは異なるが、多くの選手がブロックマシンのブロック動作に違和感はないと感じていることがアンケートにより明らかとなっている。4.2.10項において述べた通り、アタック時においてアタッカーは詳細にブロック形態を視認している可能性は低く、重要なタイミングのみ注視移動を

し、それ以外は予測で補うか周辺視野による把握をしていると考察した。ソフトウェア的特性として、限られた時間内でより効率的に視覚的探索を行うためのスキル向上にブロックマシンは貢献しているといえる。

また最後に、第5章で説明した自動制御システムより、ブロックマシンによる最終ブロック位置がアタック位置と小さい誤差で提示可能であることが示唆され、上で述べた相手ブロkkerとの位置関係を把握するスキルを向上するために、練習効率を向上する機能が付加されたといえる。

6.2 人間情報学への貢献

アタックトレーニングを拡張するシステムとして、従来のトレーニング手法では習得できない、あるいは習得が困難な技能を向上させる基盤を構築し、選手の技能向上へ繋げることを目的として、これまでシステムデザインに関して述べた。トレーニングの拡張として従来手法では習得が困難なスキルレベル、再現性、多様性に着目したシステムを構築し、その結果として実際の練習現場における継続使用から選手の技能向上が示唆された。そこで本論文で述べたトレーニングの拡張から人(選手)の機能の拡張へと展開し、選手の技能が向上することを明確に示すことで、人間情報学的観点からトレーニングを拡張するために必要な要素をさらに議論することができると考えられる。そのため、人の機能を拡張する情報学である人間情報学への貢献について以降考察する。

ブロックマシンにより提示されるブロック動作の特徴として、同一シーンの再現度の高さが挙げられる。指定された動作パラメータ(ブロック位置、高さ、各腕角度、タイミング)に従って高精度で繰り返し同一動作を提示することが可能であり、スポーツにおけるトレーニングの基本である反復練習に適しているといえる。この特徴を視点を変えて選手側に対して見ると、ブロックマシンによるブロック動作に対してアタックする選手のスキルを定量的に評価することが可能となり、また選手間で比較することが可能となる。

例えばサッカーにおける「○回りフティングができる」やバレーボールにおける「□ km/h のサーブを打つことができる」といった技術的要素(クローズドスキル)は定量的に評価することができる。しかし、特にオープンスキルが要求されるシチュエーションに対して、あるプレーシーンにおいて選手がどのように視覚認知し、状況判断を行い、プレーを遂行したかを定量的に評価することは困難である。またトレーニングによる技能向上を把握することは困難であり、これまでは選手やコーチ間の経験則に基づく評価が一般的となってしまう。一方で本システムのようにマシンによる動作再現性の高さが担保されているシステムにおいては、あるブロック状況をブ

ロックマシンによるブロック動作で提示し、A選手は100本中80本成功し、B選手は60本のみの成功であれば、その技能要素はA選手の方が高いことが示せる。また継続的な練習によりB選手が70本、80本と成功するようになれば、その技能要素が上達している過程を示すことが可能となる。

上記の技能評価は、マシンの動作再現性の高さが担保されていることにより相手コート要因が統制され、定量的評価を行うことが可能であるが、自コート要因であるセッターからトスされたボールの質(高さや速さなど)による影響を受け、シーンの再現性が低下する恐れがある。トップアスリートにおいてはトスの質のばらつきは小さいと考えられるが、厳密な評価を行っていくことを考慮すると、今後はバレーボールのサーブマシン同様、ボールをトスするトスマシン(対向する2つのローラでボールを押し出す仕組み等)を用いることにより、一定のパラメータにより自コート要因を制御することで対応できると考えられる。

このようにスポーツ分野における選手の技能評価に関して、これまでは監督や指導者などの経験や主観に依存していたが、本システムにより定量的評価が可能となり、選手(人間)のスポーツスキルを情報学的に扱うことが可能になると考えられる。さらに本論文で説明した自動制御システムにおける選手・ボール位置認識手法を応用し、各シーン状況によるアタック打ち分け結果などのデータを自動で蓄積・分析することで、選手ごとの得意・苦手技能要素を推定することが可能となる。これにより各選手が各々、苦手な状況を反復練習によりトレーニングし、効率の良い競技スキルの向上が見込まれるだろう。

6.3 スポーツ分野におけるシステム構築手法

インタラクティブなトレーニングシステムを実際の練習現場で使用してもらうためには、システムを構築すること自体が目標ではなく、実際の練習現場において「どのようなシチュエーション」で「どのように使ってもらうか」を意識したシステム設計が重要であることが本研究を通じてわかった。また、練習現場における実践的要求を満たすシステムをデザインするためには、技術的な実現可能性とそのコストに見合う解決策を適用していく必要がある。さらに、(特にトップアスリートの)練習での使用に耐えうるシステムを構築する必要がある。その際、以下の項目を考慮したシステム設計が重要となるといえる。

1. システムのセットアップから片付けまで、一貫した操作性の容易さを有し、システムを操作する上で高いUI/UXである必要がある。提案されるシステムを操作する練習現場の指導者等が「使いやすい」「簡単に使えそう」と直感的に感じることができるシステムである必要がある。ブロックマシンシステムでは、ボ

タン1つで制御用PCやモータ等が起動してキャリブレーションが行われた後、タブレットPCとの無線接続が自動で行われ、タブレット操作におけるGUI操作で容易に操作ができ、専門的な知識やスキルを必要としない。また終了時もボタン1つで終了する流れとした。

2. 練習の流れに沿った円滑なシステム稼動を行える必要がある。提案システムの各プレーが連続的に提示され、その動作復帰(次の動作への移行)も練習の流れを妨げないように設計する必要がある。ブロックマシンシステムでは、各マシンが1秒程度でブロック動作を行なった後、速やかに初期位置に復帰する制御の流れとしており、全体として動作の開始から初期位置に復帰完了し次の動作に移行可能となるまでの時間間隔は最大でも5秒であった。これは練習現場からの要望を反映させた数値であり、実際の練習において滞りなく連続的にプレーが行われていた。また、提案システムが活用される時間・メニューは、全体的なチーム練習の中でその一部分であると考えられる。そのため、提案システムが活用される前後はスムーズにシステムが導入・撤去される必要がある。ブロックマシンシステムでは、格納場所であるバレーボールコート脇にてシステムを起動し、必要なタイミングでコート内に牽引して設置し、その直後にすぐ使用できる状態となる。また撤去時も同様に格納場所まで牽引し、直後に次の練習に移行可能となる。導入・撤去にかかる時間はそれぞれ1分程度であり、練習間の休憩時間内等におさまる。
3. 練習現場の指導者や選手など実際にシステムを使用する側のスポーツ分野の方々と、システム開発を行う側の工学分野の方々が円滑にコミュニケーションする必要がある。実際の練習現場側のニーズと、システム開発側の技術的な実現可能性の双方を考慮したシステム設計を行う必要がある。本研究では、定期的に練習現場の指導者やスタッフの方々とコミュニケーションを取り要望を取り入れるだけでなく、結果としてどのように使われたかを注意深く観測し、選手や指導者の意見や使用中に撮影された動画から改善点を見出しシステムへフィードバックする過程を繰り返した。
4. 提案システムは様々な練習シチュエーションに対応できる引き出しの数を有し、限定的な機能だけでなく、シンプルな構成要素を集合させた汎用性を有する必要がある。本研究では、練習現場の指導者が基礎的な機能から別の新しい練習メニューを考案する状況や、既存の練習に新しい要素を付け加えるような状況が観測された。このように様々な練習メニューに組み込まれることにより提案システムの使用頻度が高くなり、結果として本来目的とするアタクトレーニングの効果が向上すると考えられる。

5. 提案システムは研究現場での統制された環境だけでなく、実際に使用される実環境における多様な状況に影響を受けない手法の採用・開発が必要である。本研究ではハードウェア要素として、実際の使用現場における電源のアース不安定による電磁的ノイズやWiFi環境の混線による無線通信の不安定などによるシステム可用性の低下が確認された。またソフトウェア要素として、特に画像認識における影響が大きく、ボール位置認識のための画像特徴量が選手の公式練習着と非常によく似たものとなり、ブロックマシン自動化のための認識が想定通りに機能しないなどの問題が観測された。また、タブレットの操作において想定外の使用の様子が観測され、想定通りの操作が行えない状況なども観測された。これらは早期の段階で実際の現場・想定シチュエーションでテストをしていく必要がある。また早期の段階におけるテストは、現場側と練習側の認識のズレを早期に解消するためにも重要であり、アジャイル型の開発を行っていることが好ましい。
6. 繰り返し動作・使用に耐えうるシステムの耐久性、および選手や現場の人への高い安全性を有することが必要である。スポーツ分野では繰り返し練習が基本となるため、システムに要求される耐久性は高く、また特にトッパスリートではその強度等が高いためにより深く考慮する必要がある。時として機能の拡充より自由度を減少させ、耐久性を向上させることがシステムとして十分な要求を満たす可能性がある。ブロックマシンでは、ブロック動作における重要な要素に着目し、最終的なシステム構成としてマシン1体当たり4自由度に限定した。これにより非常に高速なアタックとなる男子日本代表チームにおいても有効であることが示された。

6.4 今後の展望

本論文の第3,4,5章で説明したシステムにより、バレーボールのアタックトレーニングが拡張可能であることを示した。中期的な継続使用により、選手への影響が示唆され、また意識変化が生じたと数名の選手が報告した。一方で、選手のスキルにおいて具体的に何のスキル変化に寄与したのかは明らかになっていない。またブロックマシンに対してのみのスキル変化であったのか、実際の試合においても有効なスキル変化であったか、については明らかになっていないため、実践的な調査は今後行なっていく必要がある。特にアイトラッキングを用いて注視時間割合や視線移動回数の変化を調査することにより明らかになると考えられる。また実際の試合における効果に関しては、ある程度条件を統制する必要があるため、代表選手における検証は難しいが、ブロックマシンを全く使用しないでアタック練習を行う群と定期的にブロックマシン

を使用してアタック練習を行う群に分け、試合におけるパフォーマンス評価(アタック効果率の変化など)を行うことで明らかになってくると考えられる。

本論文はアタックトレーニングシステムとしてブロックボード、ブロックマシン、自動認識システムについて説明した。1.2節で述べた練習現場における実践的な要求については、本論文を通してその要求を満たすシステムを構築できたといえる。これは、ブロックボード、ブロックマシン男女兼用化システムが、現在も継続して練習現場において使用されていることにより示している。一方で、機能的な要求として、練習現場におけるニーズとコストに応じてシステムの機能要件の変化が考えられる。最もシンプルで簡易実装となるのはブロックボードであり、そこから必要な機能要件により、ブロックマシンにおけるジャンプ動作の付与、腕の動作の付与、横移動動作の付与が順に考えられ、最終的にブロックマシンのシステム構築となるだろう。さらに実践的な、より人間らしいシステムへの追求を想定する場合、手首や肘関節、腰関節における動作自由度の増大とともに、スポーツにおける“かけひき”や次の動作を予測する要素として表情や目線といった情報提示が重要となり、頭部モデルの付与等が考えられる。

さらなるシステムの拡張性を考慮すると、マシンによる動作提示のみに留まらず、映像提示装置によるブロック動作推移の視覚提示、およびアタッカーとの物理的接触時におけるマシン動作のハイブリッドな動作提示手法も考えられる。オープンスkill向上のための情報提示として、ブロック状況変化の視覚提示、およびその後の状況予測をさせることが重要であるといえるため、ブロックマシンによる情報提示と本質的に同様と考えられる。しかし、現状の技術における映像提示装置では、立体的に適切に映像を提示することは完全に確立されておらず、輝度や視野角などによる視認性の問題がある。また、裸眼立体映像提示技術はまだ一般的に活用できないため、特殊なメガネの装着による煩雑性の問題、また運動視差のための視点位置トラッキングの問題など、実際の練習現場において上記手法を実装するためには解決すべき点が多く残っている。これら映像提示技術における技術的課題が解決した場合は、映像提示とマシンによる物理的な情報提示は、ブロック形態を柔軟に提示できると考えられるが、現状では技術的な実現可能性とそのコストに見合う解決策を適用することを考慮すると、本研究による手法がベストプラクティスであるといえる。

一方、本手法にもトレーニングとしてのリミテーションを有する。明確な例として、特にトップレベルの選手において、相手の目線や心情、表情、駆け引きなどの内的状況の変化に応じたプレーの選択や実行が重要な要素となることがある[83]。このような微小な変化を読み取ることや細かな動作をインタラクティブに反映させることは現状のシステムデザインでは困難である。今後スポーツ工学の発展とともに、より「人間らしさ」を有したシステムとなり、より実際の試合が想定されたアタック練習とな

ると期待される。また、ブロックマシンは実際の人間と比較して、実現できる動作に機構的な制限を有する。機械が得意なこと、人間が得意なことを現場の指導者がしっかりと把握し、練習メニューを組み立てていくことがアタック技能の向上につながると考えられる。

6.5 他のスポーツ種目への適用可能性

2.1 節などで説明した通り、従来のスポーツ分野におけるトレーニングシステムのほとんどは、クローズドスキルを向上させることに留まっているといえる。一方で本システムは実際の練習現場において継続的に活用されているオープンスキルを向上させる数少ない事例であり、バレーボール種目においては初めてシステム構築に成功したといえる。2.1 節でも説明した通り、対象選手に対して視覚的にシーン状況を提示し、時事刻々と変化するコート要因を生成し、対象選手に次の動作を予測させ、次の動作を遂行させることにオープンスキル向上への寄与があるといえる。そこで同様に他のスポーツ種目へ展開することを想定すると、以下のようなシステムが見込まれる。

バドミントンやテニス、卓球のように、ネット型の球技スポーツにおける応用が期待される、これらの種目は相手コート側からの返球は1球で行わなければならないため、基本的にはオープンスキルにおける外的要因である自コート要因はないと考えられ、相手コート要因に応じた高い返球スキルが要求される。そこで相手コートの状況(相手選手の位置や動作)を提示するシステムが求められ、自走式・レール式問わず、人型のモデルが時事刻々と状況に合わせて移動し、対象選手に次の動作を予測させるとともに、空いているコースに打ち分けるスキルを身につけさせるシステムが考えられる。

第7章 結論

本論文は全7章で構成され、バレーボールにおけるアタクトレーニングを拡張するシステムデザインについて説明した。

第2章では関連研究について触れ、従来のスポーツ科学における視点、スポーツ工学の例についてまとめ、従来手法の課題を整理するとともに、バレーボールのアタクトレーニングにおける問題点を整理した。

第3章ではブロッカーの身体的特性を考慮したシステムであるブロックボードを提案した。特にブロッカー選手の動作、手指の曲げ応力、腕の押し込み応力に着目し、実際の練習現場におけるフィールド実験を通じてその有効性を確認した。ブロックボードは、相手コート要因を統制した状況下における自コーチ要因に応じた状況認識、予測、動作遂行を実施することが可能であり、オープンスキル向上に貢献できることを示した。

第4章ではブロック動作のインタラクティブ提示のためのブロックマシンを提案した。第3章で有効性を確認したブロックボードを発展させ、実時間で状況生成をし、動的にブロック形態を提示するインタラクティブシステムとして、ブロックマシン1号機、ブロックマシン2号機、男女兼用化について説明した。特に時事刻々と変化するブロック形態を提示することにより、アタッカーは相手コート要因を把握し、ブロックの動作を予測した上で行動選択するスキルが要求され、オープンスキルとしての重要な要素に寄与したことを示した。

第5章ではリアルタイムトラッキングによるブロックマシン自動制御のためのシステムを提案した。第4章で有効性を確認したブロックマシンシステムにおける欠点である、アタック位置とブロック位置の誤差による練習効率の低下を解決するため、選手動作とボール動作の推定によるアタック位置予測手法について説明した。システムの自動化によりさらなる練習効率の向上や副次的効果である人員の削減、選手の技能評価の定量化などへの展望について示した。

第6章ではこれまでのスポーツ科学に関する先行研究を概観し、練習現場における実践的要求をシステムデザインを通じて構築した結果として、3-5章から得られた知見を整理し、スポーツビジョン能力向上、および人間情報学への貢献について考察した。

本研究は、スポーツトレーニングにおける実践的要求を工学的手法により解決する手法について説明した。なお実際の練習現場からの実践的要求は以下の通りであった。

- 3体ほどの機械が横にスライドして動き、ブロックする
- ネット下にレールがあり、そのレール上を選手大の人形がスライドして動く
- アメリカやブラジルなどのトップチームのブロック高さを想定
- センサーを介した反応の良さ、腕関節の動き、細部の作り

特にブロック動作の提示、およびトレーニングシステムとして、重要となる要素に着目して議論し、工学システムへ落とし込む手順について触れ、システム指針、設計、構築、評価、運用を述べ、まとめとした。当初の現場における狙いとしては、ブロックをすること(=アタックを止めること)が目的となっていたが、システムを構築していく上で、適切なタイミングでブロック形態を提示することがアタクトレーニングにおいて重要であり、対象選手に相手の状況を把握させ、動作を予測させるためのシステム構築が重要であることがわかった。

また、アタクトレーニングを拡張するシステム要件として、本研究により構築されたシステムによって以下のことが明らかとなった。

1. 指の曲げ応力の再現により、アタックシーンにおけるワンタッチを再現可能(第3章：ブロックボード)
2. 腕の押し込み応力の再現により、アタックシーンにおけるブロック後の挙動を再現可能(第3章：ブロックボード)
3. ネット上部に出現するブロック形態の再現により、相手コート要因把握のための情報提示が可能(第3章：ブロックボード)
4. 時時刻刻と変化する相手プレイヤーの動きの提示により、状況予測のための情報提示が可能(第4章：ブロックマシン)
5. アタッカーと対向するブロkkerの位置整合性が練習効率を向上させることを示唆(第5章：自動制御システム)

さらに、オープンスキルを向上させるインタラクティブなトレーニングシステムとして、①世界トップレベルの動作の提示、②選手に応じた多様なレベル設定、③同一シーンの再現性、④技術力の定量的評価、以上4点が可能となることを示した。

謝辞

本研究を行うにあたり、岩田洋夫教授、矢野博明教授には、約6年間に渡り多大な研究指導を賜りました。ここに心から感謝の意を表します。

また葛岡英明教授、パナソニック株式会社顧問野村淳二氏、村上史明助教、山田亜紀助教には、審査を通して多くの貴重なご意見を頂きました。深く御礼申し上げます。また研究室内では技術的な部分で橋本悠希助教、圓崎祐貴助教にご協力いただきましたことを深く感謝致します。

本研究の一部はスポーツ庁ハイパフォーマンスサポート事業(旧文部科学省マルチサポート事業)により支援を受けました。特に、プロジェクト発足当時から多大なご尽力をいただきました永原隆氏には心より感謝いたします。また藤井範久教授、北村麻衣氏、三枝巧氏、阿江数通氏、言上智洋氏、金井瞳氏には、当プロジェクトが円滑に進むために多方面からサポートいただきました。ここに御礼を申し上げます。

当時全日本女子女子代表チーム監督の眞鍋政義氏をはじめ、アナリストの渡辺啓太氏、コーチの大久保茂和氏、川北元氏、斉藤健次氏、三枝大地氏、辻健志氏、水野秀一氏、スタッフの前本諒太氏にはプロトタイプの試験から実際の練習における運用に至るまで様々な点においてご協力いただき深く感謝致します。引き続き東京オリンピックに向けてブロックマシンの継続的な運用が行われ、メダルが獲得できることを願っております。

ブロックマシンの開発に関しまして、株式会社小野電機製作所の皆様にはハードウェアの面から多くのサポートを頂きました。ここに御礼を申し上げます。

エンパワーメント情報学プログラム(EMP)の同期には、プログラム1年次としてお互い励まし合いながら、また刺激し合いながら5年間ともに過ごせたことを感謝しております。EMPの先輩方には、様々なご助言を頂きましたことをここで御礼申し上げます。また、EMP事務室の皆様には、出張や物品購入等の事務手続きに関して大変お世話になりました。

バーチャルリアリティ研究室の皆様には、日頃より研究生活を共にし、主に精神的に支えていただき、有意義な研究生活を送ることができたと感じています。

最後に、私の意志を尊重してくださり、5年間のとてもとても長い大学院生活を支えていただいた家族に心から感謝致します。

参考文献

- [1] Shoichi Hasegawa, Seiichiro Ishijima, Fumihiko Kato, Hironori Mitake, and Makoto Sato. Realtime sonification of the center of gravity for skiing. In *Proceedings of the 3rd Augmented Human International Conference*, No. 11, pp. 1–4, 2012.
- [2] 本荘直樹, 伊坂忠夫, 満田隆, 川村貞夫. HMD を用いたスポーツスキルの学習方法の提案. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 1, pp. 63–69, 2005.
- [3] Junya Tominaga, Kensaku Kawauchi, and Jun Rekimoto. Around me: A system with an escort robot providing a sports player’s self-images. In *Proceedings of the 5th Augmented Human International Conference*, AH ’14, pp. 43:1–43:8, 2014.
- [4] F. L. Lin, C. L. Chang, Y. T. Jou, H. C. Pan, and T. Y. Hsu. The study of influence of fencing handle type and handle angle on wrist for a fencing game. In *2010 IEEE 17th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, pp. 1624–1627, 2010.
- [5] Stratasys. https://www.stratasys.co.jp/-/media/files/case-studies/education/cs_pj_ed_tsukuba_160108a.jp.pdf (2018/12/24 accessed).
- [6] 結城匡啓. スラップスケートの利点と長野オリンピックに向けた日本チームの取り組み (<特集> 最新のスポーツ工学: 用具と施設を中心に). バイオメカニズム学会誌, Vol. 24, No. 2, pp. 76–81, 2000.
- [7] Alina Bialkowski, Patrick Lucey, Peter Carr, Yisong Yue, Sridha Sridharan, and Iain Matthews. Large-scale analysis of soccer matches using spatiotemporal tracking data. In *Data Mining (ICDM), 2014 IEEE International Conference on*, pp. 725–730. IEEE, 2014.
- [8] 相馬りか. 科学技術動向研究スポーツにおける情報活用–オリンピックから健康づくりまで–. Vol. 148, pp. 23–26, 2015.

-
- [9] Tom Decroos, Jan Van Haaren, and Jesse Davis. Automatic discovery of tactics in spatio-temporal soccer match data. In *Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, KDD '18, pp. 223–232. ACM, 2018.
- [10] Hawk-Eye. <https://www.hawkeyeinnovations.com/> (2018/12/14 accessed).
- [11] Harry Collins and Robert Evans. You cannot be serious! public understanding of technology with special reference to “hawk-eye”. *Public Understanding of Science*, Vol. 17, No. 3, pp. 283–308, 2008.
- [12] Oliver Grau, Graham A Thomas, A Hilton, J Kilner, and J Starck. A robust free-viewpoint video system for sport scenes. In *3DTV Conference, 2007*, pp. 1–4. IEEE, 2007.
- [13] Takayoshi Koyama, Itaru Kitahara, and Yuichi Ohta. Live mixed-reality 3D video in soccer stadium. In *Proceedings of the 2nd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, p. 178. IEEE Computer Society, 2003.
- [14] スポーツ庁受託事業：ハイパフォーマンスサポート戦略事業 (オリンピック・パラリンピック). <https://www.jpnsport.go.jp/corp/gyoumu/tabid/432/Default.aspx> (2018/12/25 accessed).
- [15] 文部科学省マルチサポート事業. http://www.soumu.go.jp/main_content/000456623.pdf (2018/12/25 accessed).
- [16] 渡辺啓太, 佐藤文彦. レセプションとアタックの成績との関係に関する検討. バレーボール研究 = *Journal of volleyball sciences*, Vol. 18, No. 1, pp. 40–45, 2016.
- [17] 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.
- [18] 米沢利広, 今丸好一郎ほか. バレーボールにおける攻撃戦術に関する事例研究: センター・ライト攻撃で5割の打数と50%の決定率を目指して. 福岡大学スポーツ科学研究, Vol. 44, No. 2, pp. 29–40, 2014.
- [19] EC Poulton. On prediction in skilled movements. *Psychological bulletin*, Vol. 54, No. 6, p. 467, 1957.

- [20] Stephen H Boucher and Robert J Rotella. A psychological skills educational program for closed-skill performance enhancement. *The Sport Psychologist*, Vol. 1, No. 2, pp. 127–137, 1987.
- [21] Richard C Thelwell, Iain A Greenlees, and Neil JV Weston. Using psychological skills training to develop soccer performance. *Journal of Applied Sport Psychology*, Vol. 18, No. 3, pp. 254–270, 2006.
- [22] Fran Allard and Janet L Starkes. Motor-skill experts in sports, dance, and other domains. *Toward a general theory of expertise: Prospects and limits*, pp. 126–152, 1991.
- [23] A Mark Williams, Keith Davids, Les Burwitz, and John G Williams. Visual search strategies in experienced and inexperienced soccer players. *Research quarterly for exercise and sport*, Vol. 65, No. 2, pp. 127–135, 1994.
- [24] 田中雅人. ボールゲームにおける状況判断と知識の構造. Vol. 51, No. 1, pp. 107–114, 2004.
- [25] Pitching machine. <https://products.mizuno.jp/c/item/1GJMA10000/001015003> (2018/12/16 accessed).
- [26] Robokeeper. <http://thomaspfeifer.net/robokeeper.htm> (2018/12/16 accessed).
- [27] フォルフェウス. https://www.omron.co.jp/innovation/forpheus_developer.html (2018/12/16 accessed).
- [28] Julian Stoev, Steven Gillijns, Andrei Bartic, and Wim Symens. Badminton playing robot-a multidisciplinary test case in mechatronics. *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 43, No. 18, pp. 725–731, 2010.
- [29] Takashi Kawamura, Ryosuke Kamimura, Satoshi Suzuki, and Kojiro Iizuka. A study on the curling robot will match with human result of one end game with one human. In *2015 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games (CIG)*, pp. 489–495, Aug 2015.
- [30] Daisuke Ochi, Akio Kameda, Kosuke Takahashi, Motohiro Makiguchi, and Kouta Takeuchi. VR technologies for rich sports experience. In *ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies*, pp. 1–2. ACM, 2016.

-
- [31] Yazhou Huang, Lloyd Churches, and Brendan Reilly. A case study on virtual reality american football training. In *Proceedings of the 2015 Virtual Reality International Conference*, No. 6, pp. 1–5. ACM, 2015.
- [32] Daniel Thalmann, Jun Lee, and Nadia Magnenat Thalmann. An evaluation of spatial presence, social presence, and interactions with various 3D displays. In *Proceedings of the 29th International Conference on Computer Animation and Social Agents*, pp. 197–204. ACM, 2016.
- [33] Helen C Miles, Serban R Pop, Simon J Watt, Gavin P Lawrence, and Nigel W John. A review of virtual environments for training in ball sports. *Computers & Graphics*, Vol. 36, No. 6, pp. 714–726, 2012.
- [34] Mads Møller Jensen, Majken K Rasmussen, Florian Floyd Mueller, and Kaj Grønbaek. Keepin’it real: challenges when designing sports-training games. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2003–2012. ACM, 2015.
- [35] César Daniel Rojas Ferrer, Itaru Kitahara, and Yoshinari Kameda. Read-the-game skill evaluation by analyzing head orientation in immersive VR. In *3DTV Conference: The True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON)*, 2017, pp. 1–4. IEEE, 2017.
- [36] Alexandra Covaci, Anne-Hélène Olivier, and Franck Multon. Visual perspective and feedback guidance for VR free-throw training. *IEEE computer graphics and applications*, No. 5, pp. 55–65, 2015.
- [37] 前田太郎. 知覚系の視点から見た HMD: HMD の処方箋-含有成分と使用上の注意. 日本バーチャルリアリティ学会誌= Journal of the Virtual Reality Society of Japan, Vol. 3, No. 2, pp. 119–125, 1998.
- [38] Mobile Virtual Player. <http://www.mobilevirtualplayer.com/> (2018/12/13 accessed).
- [39] Claas Kuhlmann, Karen Roemer, and Thomas L Milani. Aspects of a three dimensional motion analysis of the volleyball spike in high level competition. In *ISBS-Conference Proceedings Archive*, Vol. 1, pp. 47–50, 2007.
- [40] H. Wagner, M. Tilp, S. V. Duvillard, and E. Mueller. Kinematic analysis of volleyball spike jump. *International journal of sports medicine*, Vol. 30, No. 10, pp. 760–765, 2009.

- [41] Yasar Salci, Behzat Bahadir Kentel, Cengiz Heycan, Sabire Akin, and Feza Korkusuz. Comparison of landing maneuvers between male and female college volleyball players. *Clinical Biomechanics*, Vol. 19, No. 6, pp. 622–628, 2004.
- [42] Andrew S Rokito, Frank W Jobe, Marilyn M Pink, Jacquelin Perry, and John Brault. Electromyographic analysis of shoulder function during the volleyball serve and spike. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, Vol. 7, No. 3, pp. 256–263, 1998.
- [43] SGS Coleman, AS Benham, and SR Northcott. A three-dimensional cinematographical analysis of the volleyball spike. *Journal of sports sciences*, Vol. 11, No. 4, pp. 295–302, 1993.
- [44] 小林海, 黒川貞生, 亀ヶ谷純一, 矢島忠明. ブロッカーのポジショニングがコンビネーション攻撃のディフェンスに及ぼす効果. バレーボール研究= Journal of volleyball sciences, Vol. 15, No. 1, pp. 1–7, 2013.
- [45] 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. バレーボール研究 = Journal of volleyball sciences, Vol. 18, No. 1, pp. 12–18, 2016.
- [46] Hua-Tsung Chen, Wen-Jiin Tsai, Suh-Yin Lee, and Jen-Yu Yu. 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, 2012.
- [47] Heloisa Alves, Michelle Voss, Walter R Boot, Andrea Deslandes, Victor Cossich, Jose Inacio Salles, and Arthur F Kramer. Perceptual-cognitive expertise in elite volleyball players. *Frontiers in psychology*, Vol. 4, p. 36, 2013.
- [48] José Afonso and Isabel Mesquita. Skill-based differences in visual search behaviours and verbal reports in a representative film-based task in volleyball. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, Vol. 13, No. 3, pp. 669–677, 2013.
- [49] 山田健人, 金澤靖, 金谷健一. 2画像からの3次元復元の最新アルゴリズム (パターン認識・メディア理解). 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 109, No. 182, pp. 95–102, 2009.
- [50] 中井聖, 村本名史, 栗田泰成, 高根信吾, 瀧澤寛路, 塚本博之, 河合学. バレーボールコート内の既知点を用いた3次元座標空間の再構築方法の精度とその特徴. バレーボール研究= Journal of volleyball sciences, Vol. 19, No. 1, pp. 34–42, 2017.

- [51] Anatomography. <http://lifesciencedb.jp/bp3d/> (2018/11/05 accessed).
- [52] 工藤健司, 島津大宣, 泉川喬一, 田原武彦, 柏森康雄. バレーボールにおける攻撃力評価に関する研究 (3)–2000 オリンピック大会女子最終予選, 日本チームと対戦チームの攻撃力比較–. バレーボール研究= Journal of volleyball sciences, Vol. 5, No. 1, pp. 18–25, 2003.
- [53] 門田充司, 近藤直. 農業用ロボットのマン・マシン協調システム 第1報マニピュレータを対象とした危険度の算出. 農業機械学会誌, Vol. 61, No. 2, pp. 81–90, 1999.
- [54] Martinus JA Buekers. The time structure of the block in volleyball: a comparison of different step techniques. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, Vol. 62, No. 2, pp. 232–235, 1991.
- [55] 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. 体育学研究, Vol. 53, No. 1, pp. 61–74, 2008.
- [56] 諏訪正樹. スポーツの技の習得のためのメタ認知的言語化: 学習方法論 (how) を探究する実践. FIT2007, イベント企画 「近未来技術と情報科学–スポーツと情報技術–」 抄録, 2007.
- [57] 黒川貞生, 森田恭光, 亀ヶ谷純一, 加藤浩人, 松井泰二, 鈴木陽一, 矢島忠明. 世界トップレベル・バレーボール選手のスパイク動作特性. カルチャール, Vol. 2, No. 1, pp. 23–29, 2008.
- [58] 岡野憲一, 谷川聡. 男子バレーボール選手の身長に関する研究. バレーボール研究 = Journal of volleyball sciences, Vol. 17, No. 1, pp. 37–41, 2015.
- [59] 陶山智, 藤田主一, 小塩真司, 大東忠司. オープンスキル・スポーツにおける駆け引き上手尺度の作成. 応用心理学研究= Japanese journal of applied psychology, Vol. 43, No. 2, pp. 134–143, 2017.
- [60] 吉田康成, 西博史, 福田隆, 遠藤俊郎, 橋原孝博. バレーボールのブロック技術に関する研究: コンビネーション攻撃のサイド攻撃に対するブロックに着目して. バレーボール研究, Vol. 17, No. 1, pp. 28–36, 2015.

-
- [61] H. Ben Shitrit, J. Berclaz, F. Fleuret, and P. Fua. Tracking multiple people under global appearance constraints. In *2011 International Conference on Computer Vision*, pp. 137–144, 2011.
- [62] Jingchen Liu, Peter Carr, Robert T. Collins, and Yanxi Liu. Tracking sports players with context-conditioned motion models. In *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 1830–1837, 2013.
- [63] W. Lu, J. Ting, J. J. Little, and K. P. Murphy. Learning to track and identify players from broadcast sports videos. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 35, No. 7, pp. 1704–1716, 2013.
- [64] Sian Barris and Chris Button. A review of vision-based motion analysis in sport. *Sports Medicine*, Vol. 38, No. 12, pp. 1025–1043, 2008.
- [65] Chengzhe Li, Lai Yoong Yee, Hiroshi Maruyama, and Yoshiki Yamaguchi. FPGA-based volleyball player tracker. *ACM SIGARCH Computer Architecture News*, Vol. 44, No. 4, pp. 80–86, 2017.
- [66] 丸山裕士, 李成哲, 山口佳樹, 児玉祐悦. バレーボール試合映像からの実時間選手追跡システム. 情報科学技術フォーラム講演論文集, Vol. 13, No. 1, pp. 225–226, 2014.
- [67] Zhe Cao, Tomas Simon, Shih-En Wei, and Yaser Sheikh. Realtime multi-person 2d pose estimation using part affinity fields. In *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 1302–1310. IEEE, 2017.
- [68] Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, and Ali Farhadi. You only look once: Unified, real-time object detection. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 779–788, 2016.
- [69] Kentaro Yagi, Kunihiro Hasegawa, Yuta Sugiura, and Hideo Saito. Estimation of runners’ number of steps, stride length and speed transition from video of a 100-meter race. In *Proceedings of the 1st International Workshop on Multimedia Content Analysis in Sports, MMSports’18*, pp. 87–95. ACM, 2018.
- [70] Yuuki Horiuchi, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Computational foresight: forecasting human body motion in real-time for reducing delays in interactive system. In *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, pp. 312–317. ACM, 2017.

- [71] M. Takahashi, K. Ikeya, M. Kano, H. Ookubo, and T. Mishina. Robust volleyball tracking system using multi-view cameras. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 2740–2745, 2016.
- [72] Hidehiko Shishido, Yoshinari Kameda, Yuichi Ohta, and Itaru Kitahara. Visual tracking method of a quick and anomalously moving badminton shuttlecock. *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, Vol. 5, No. 3, pp. 110–120, 2017.
- [73] Graham B Erickson. *Sports vision: vision care for the enhancement of sports performance*. Elsevier Health Sciences, 2007.
- [74] 増山光洋. バレーボール選手におけるスポーツビジョン能力の検討: Vリーグ選手と大学生選手の比較. Vol. 23, pp. 45–53, 2006.
- [75] M. H. Melcher and D. R. Lund. Sports vision and the high school student athlete. *Journal of the American optometric Association*, Vol. 63, No. 7, pp. 466–474, 1992.
- [76] Claude Goulet, Chantai Bard, and Michelle Fleury. Expertise differences in preparing to return a tennis serve: A visual information processing approach. *Journal of sport and Exercise Psychology*, Vol. 11, No. 4, pp. 382–398, 1989.
- [77] Geert JP Savelsbergh, John Van der Kamp, A Mark Williams, and Paul Ward. Anticipation and visual search behaviour in expert soccer goalkeepers. *Ergonomics*, Vol. 48, No. 11-14, pp. 1686–1697, 2005.
- [78] Tomohisa Nagano, Takaaki Kato, and Tadahiko Fukuda. Visual search strategies of soccer players in one-on-one defensive situations on the field. *Perceptual and motor skills*, Vol. 99, No. 3, pp. 968–974, 2004.
- [79] 竹内高行, 猪俣公宏. 野球の打撃時における視覚探索方略. スポーツ心理学研究, Vol. 39, No. 1, pp. 47–59, 2012.
- [80] 清水安夫, 煙山千尋, 尼崎光洋. スポーツ競技者の視覚認知とパフォーマンスとの関係: バドミントン選手の動体視力とパフォーマンス変数を指標とした検討. 桜美林論考. 自然科学・総合科学研究, Vol. 1, pp. 81–95, 2010.
- [81] 梶原慶, 佐々木宏, 杉之原正純. スポーツにおける知覚スキルトレーニング (1): Williams & grant, 1999 より. 広島修大論集. 人文編, Vol. 43, No. 1, pp. 315–334, 2002.

- [82] Sean Müller, Bruce Abernethy, and Damian Farrow. How do world-class cricket batsmen anticipate a bowler's intention? *The quarterly journal of experimental psychology*, Vol. 59, No. 12, pp. 2162–2186, 2006.
- [83] 宮田睦美, 八板昭仁, 青柳領, 北田豊治. バレーボールの攻撃行動における攻撃結果に影響する要因：九州大学バレーボールリーグ女子選手を対象として. 九州共立大学研究紀要 = Study journal of Kyushu Kyoritsu University, Vol. 6, No. 2, pp. 1–9, 2016.

公表論文リスト

査読付き雑誌論文

- 1) **Kosuke Sato**, Keita Watanabe, Shuichi Mizuno, Masayoshi Manabe, Hiroaki Yano, and Hiroo Iwata, “Development and Assessment of a Block Machine for Volleyball Attack Training”, *Advanced Robotics*, Vol.31, No.21, pp.1-13, 2017.
- 2) 佐藤綱祐, 植田真弘, 渡辺啓太, 水野秀一, 眞鍋政義, 矢野博明, 岩田洋夫, “バレーボールにおけるブロックマシンの開発と運用”, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.22, No.4, pp.467-476, 2017.

(以下, 本論文に関連しない論文)

- 3) 西田惇, 松田壮一郎, 大木美加, 高鳥光, 佐藤綱祐, 鈴木 健嗣, “身体性変換スーツによる小児体験における知覚・運動特性の評価”, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.23, No.3, pp.149-158, 2018.
- 4) 佐藤綱祐, 西田惇, 高鳥光, 鈴木健嗣, “CHILDHOOD: 小児の体験を再現する装着型身体性変換スーツ”, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.22, No.1, pp.71-80, 2017.

査読付き国際論文

- 1) **Kosuke Sato**, Keita Watanabe, Hiroaki Yano, and Hiroo Iwata, “Motion Recognition for Automatic Control of a Block Machine”, *Proc. of ACM Virtual Reality Software and Technology*, 2018.
- 2) **Kosuke Sato**, Keita Watanabe, Shuichi Mizuno, Masayoshi Manabe, Hiroaki Yano, and Hiroo Iwata, “Development of a Block Machine for Volleyball Attack Training”, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1036-1041, 2017.

- 3) **Kosuke Sato**, Yuki Hashimoto, Hiroaki Yano, and Hiroo Iwata, “Development of Ball Game Defense Robot Based on Physical Properties and Motion of Human”, Proc. of Asia Haptics, pp.261-265, 2014.
- 4) **Kosuke Sato**, Masahiro Ueda, Yuki Hashimoto, Hiroaki Yano, and Hiroo Iwata, “Pass Cutting Robot for Basketball Drill ”, Proc. of AEARU-CSWT, SCWT-48-O, 2015.
(以下, 本論文に関連しない論文)
- 5) Ryoichi Ando, Mai Orikasa, Minato Takeda, Hirohiko Hayakawa, **Kosuke Sato**, Isao Uebayashi, Kouta Minamizawa and Masahiko Inami, “Superhuman Sports Games in Laval Virtual”, Laval Virtual ReVolution, France, March 22-26, 2017.
- 6) Akihiko Shirai, Jun Nishida, Takahiro Sato, **Kosuke Sato**, Hikaru Takatori and Susumu Tachi, “Innovation in the age of virtual reality through organizing international student competition ”, SIGGRAPH ASIA 2015 Symposium on Education, Kobe, Nov. 2-5, 2015.
- 7) Jun Nishida, Hikaru Takatori, **Kosuke Sato** and Kenji Suzuki, “CHILDHOOD: Wearable Suit for Augmented Child Experience ”, SIGGRAPH 2015 Posters, USA, Aug. 9-13, 2015.
- 8) Jun Nishida, Hikaru Takatori, **Kosuke Sato** and Kenji Suzuki, “CHILDHOOD: Wearable Suit for Augmented Child Experience ”, SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies, USA, Aug. 9-13, 2015.
- 9) Jun Nishida, Hikaru Takatori, **Kosuke Sato** and Kenji Suzuki, “CHILDHOOD: Wearable Suit for Augmented Child Experience ”, Laval Virtual ReVolution, France, Apr. 8-12, 2015.
- 10) Jun Nishida, Hikaru Takatori, **Kosuke Sato** and Kenji Suzuki, “CHILDHOOD: Wearable Suit for Augmented Child Experience ”, Virtual Reality International Conference, France, Apr. 8-12, 2015.

査読なし国内会議・報告

- 1) 佐藤綱祐, 渡辺啓太, 矢野博明, 岩田洋夫, “単眼バレーボール映像を用いたアタック位置予測”, 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会予稿集, 12C-6, 2018.

- 2) 佐藤綱祐, 渡辺啓太, 水野秀一, 眞鍋政義, 矢野博明, 岩田洋夫, “バレーボールにおけるブロックマシンの選手への効果”, 第22回日本バーチャルリアリティ学会大会予稿集, 3F-1, 2017.
- 3) 佐藤綱祐, 矢野博明, 岩田洋夫, “バレーボールにおけるアタクトレーニングシステムの開発”, 第2回超人スポーツ学術研究会予稿集, pp.17-18, 2016.
- 4) 佐藤綱祐, “スポーツテクノロジーの研究開発”, 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol.23, No.2, pp.13-18, 2018.
(以下, 本論文に関連しない論文)
- 5) 圓崎祐貴, 佐藤綱祐, 岩田洋夫, “拡張揺動自動車”, 第23回日本バーチャルリアリティ学会大会, Sep.19-21, 2018.
- 6) 佐藤綱祐, 陽奥幸宏, 杉妻謙, 坂井聡, 水野義博, “ひらがな書字学習における触覚化支援手法”, インタラクシオン2018(プレミアム発表), March.5-7, 2018.
- 7) 佐藤綱祐, 上林功, 片桐祥太, 矢野博明, 岩田洋夫, “小型モータデバイスを用いた新スポーツの開発と運動特性”, 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, Dec.20-22, 2017.
- 8) 佐藤綱祐, 上林功, 小野田圭祐, 片桐祥太, 矢野博明, 岩田洋夫, “CarryOtto: 人と機械が一体化した移動デバイスの開発”, インタラクシオン2017(プレミアム発表), March.2-4, 2017.
- 9) 上林功, 佐藤綱祐, 小野田圭祐, 片桐祥太, “新スポーツ開発を通じたメイカーズコミュニティの形成について～超人スポーツ「CarryOtto<キャリオット>」～”, 第2回超人スポーツ学術研究会, pp.23-28, Dec.18, 2016.
- 10) 上林功, 佐藤綱祐, 小野田圭祐, “インホイールモータによる小型モータデバイスを使った新スポーツの開発について～超人スポーツ CarryOtto<キャリオット>～”, 第1回超人スポーツ学術研究会, Dec.10, 2015.

受賞等 (本論文に関連する成果に対する受賞は下線で記載)

- 1) ACM VRST SQUARE ENIX AWARD, 2018
- 2) 日本バーチャルリアリティ学会論文賞, 2018
- 3) 筑波大学学長表彰, 2018
- 4) 情報処理学会 インタラクション インタラクティブ発表賞, 2018
- 5) IEEE ICRA Best Paper Award on Human-Robot Interaction, 2017
- 6) IEEE Robotics and Automation Society Japan Joint Chapter Young Award, 2017
- 7) Laval Virtual SPORT & LEISURE, 2017
- 8) 情報処理学会 インタラクション インタラクティブ発表賞, 2017
- 9) 第2回超人スポーツ学術研究会 研究奨励賞, 2016
- 10) 全国リーディング大学院 第1回ビジネス構想コンペティション 優秀賞, 2016
- 11) 第9回 KIDS DESIGN AWARD キッズデザイン賞, 2015
- 12) 第9回 KIDS DESIGN AWARD TEPIA 特別賞, 2015
- 13) Microsoft Imagine Cup ワールドシチズン部門賞, 2015
- 14) Laval Virtual LEARNING, SCIENCES & HUMANITIES, 2015
- 15) 筑波大学学長表彰, 2015
- 16) IVRC(国際対抗学生バーチャルリアリティコンテスト) 総合優勝, 2014
- 17) IVRC Laval Virtual 賞, 2014
- 18) IVRC クリスティ・デジタル・システムズ社賞, 2014