

温熱快適性向上と視触覚刺激を用いる作業負荷の低減
による運動時パフォーマンス向上に関する研究

2020年 3月

佐野 祐士

温熱快適性向上と視触覚刺激を用いる作業負荷の低減
による運動時パフォーマンス向上に関する研究

佐野 祐士

グローバル教育院

エンパワーメント情報学プログラム

筑波大学

2020年 3月

Abstract

The purpose of this thesis was to develop a system that supports player's performance during sports by improving workload from thermal environment and overall sports environment. In Chapter 2, from the aspect of thermal environment, a thermal environment control system for the training space using the thermal environment index PMV was proposed. To realize this, PMV parameter measurement methods suitable for the proposed system were proposed and verified for both clothing and metabolic rate, and the feasibility was demonstrated. In Chapter 3, from the aspect of sports environment, we proposed a perceptual expansion system that temporarily raises the performance level in order to improve beginner player's motivation. In the visualization of the ball trajectory, it was clarified that the response speed of pass acceptance improved by an average of 88 msec by visual feedback. In the presentation of out-of-view information, NASA-TLX and pass-cut score evaluation during pass-cut task revealed the effect of improving score and motivation by reducing workload. Based on the above, this study revealed the feasibility of the technology for improving the performance by controlling thermal comfort and reducing work load during exercise. The results of this research will contribute to the sports field, such as motivation for beginner sports and the realization of a more efficient training environment for professional athletes.

目次

第1章 序論	1
1.1 スポーツと人	1
1.2 スポーツにおけるスキルとパフォーマンス	1
1.3 パフォーマンスに与える温熱快適性と作業負荷の影響	2
1.4 関連研究	2
第2章 温熱快適性の向上	4
2.1 まえがき	4
2.2 着衣量計測	5
2.2.1 着衣量計測システム	5
2.2.2 システム評価実験	6
2.2.3 結果・考察	7
2.3 代謝量計測	9
2.3.1 代謝量計測システム	9
2.3.2 システム評価実験	10
2.3.3 結果・考察	11
2.4 まとめ	13
第3章 作業負荷の低減	14
3.1 まえがき	14
3.2 システムデザイン	16
3.2.1 システム概要	16
3.2.2 視覚刺激提示	19
3.2.3 触覚刺激提示	19
3.3 ボール軌道可視化	21
3.3.1 ボール軌道可視化システム	21
3.3.2 システム評価実験	23
3.3.3 結果・考察	24
3.4 視野外情報提示	25
3.4.1 視野外情報提示システム	25
3.4.2 システム評価実験	25
3.4.3 結果・考察	28

3.5 まとめ	31
第4章 結論	32
4.1 研究成果の概要	32
4.2 残された課題	33
謝辞	34
参考文献	35
著者文献	38
付録：視野外位置情報提示実験における実験アンケート	40

目 次

2.1 提案する温熱環境コントロールシステム概要	4
2.2 着衣下体表面温度計測実験の概要	6
2.3 各部位の体表面温度を用いた相関係数 R	7
2.4 各部位の体表面温度を用いた相関係数における P 値	7
2.5 最小二乗法により求めた胸部・腕部と腹部・首周りの体表面温度回帰直線	8
2.6 胸囲変化を用いる代謝量推定の着眼点	9
2.7 胸囲変化・肺容量計測実験	10
2.8 胸囲変化・肺容量計測実験結果	11
2.9 想定されるキャリブレーション手順	12
3.1 視触覚刺激提示システムを稼働させた状態でサッカーをプレイしている様子	15
3.2 Large Space の設備概要	17
3.3 プレイヤーのトラッキングに用いる再帰性反射マーカを取り付けた帽子	18
3.4 提案システムによる視覚刺激提示例（偶数 id が 1 つ、奇数 id が 2 つの場合）	18
3.5 振動提示デバイスの構成	20
3.6 プレイヤーが振動提示デバイスを装着した様子	20
3.7 デバイス装着者と相手プレイヤーとの相対的な位置関係に応じた振動提示デバイスの動作	21
3.8 ボール軌道予測線の実装結果	22
3.9 弾道予測線提示システムの評価実験環境	23
3.10 弾道予測線提示システムの評価実験手順	23
3.11 弾道予測線提示システムの評価実験結果	24
3.12 視野外情報提示システムの評価実験概要	26
3.13 各条件下におけるパスカットスコアの平均	28
3.14 NASA-TLX スコアの平均 (a) NASA-TLX トータルスコア, (b) Q1: 知的・知覚的負担, (c) Q2: 身体的負担, (d) Q3: タイムプレッシャー, (e) Q4: 作業成績, (f) Q5: 努力, (g) Q6: フラストレーション	29

第1章 序論

1.1 スポーツと人

スポーツは、身体的努力を伴う運動であり、その定義は多様であるが、スポーツは遊びの領域にも関わっている [1]。その文化的性格を考えれば、すなわち人類の出現とともにスポーツが誕生したと言える。

近代化に伴って、それまで暴力的で無秩序だったスポーツは、様々な制度のもとで市民に親しまれるものとなった。今日に至っては、レクリエーションや自己鍛錬などとして、教育から生涯学習までのあらゆる場面でスポーツは活用されている。

また、現代社会の運動不足を補うかのように、エクササイズ・フィットネス文化も普及してきた [2]。トレーニング手法や [3, 4]、障害者・高齢者の参加 [5] など、多方面から研究のアプローチがなされているように、スポーツの参加機会を増進させることは社会を豊かにする。

統計手法によって多少の前後はあるものの、世界的に普及しているスポーツはサッカーやバレーボール、バスケットボールなどの球技である。これらはチームスポーツであり、一体感や、達成感を共有することに大きな価値がある。一方で、自己の運動能力を向上させることがスポーツ継続のモチベーションにもなっている [6]。

1.2 スポーツにおけるスキルとパフォーマンス

大築 (1989) [7] によれば、スキルは4つの要素からなり、状況判断能力、正確さ、素早さ、そしてこれらの持続性である。これらの要素を含んだスポーツ技術が個人の身体的要素や精神的要素が関与する中で習得・体得されたものがスポーツスキルであり、運動の実行やその過程がパフォーマンスであると捉えられている [8]。

スポーツ技術そのものは書籍や動画などから学ぶことができるが、実践に移した際の上手・下手には差異が生じることから、これを各人のスキルレベルだとみなせる。そして、スキルを発揮できているかのものさしが、パフォーマンスである。パフォーマンスは、スキルレベルの他に、環境や自己のフィジカルに大きく影響されると考えられている。

また、スポーツ心理学の分野では、動機づけ・自信・運動パフォーマンスに対して、目標設定の有効性が多く報告されている。したがって、「思ったよりできる」のように、自己に内在する目標を超えることで、運動パフォーマンスが向上することが見込まれる。

1.3 パフォーマンスに与える温熱快適性と作業負荷の影響

本研究は、運動時のパフォーマンスに与える温熱快適性と作業負荷の影響に着目し、その両面から支援するシステムに必要な技術の開発を目的とする。

一般に温熱環境は運動パフォーマンスに大きく影響することが知られている [9]。また、熱ストレスは無意識に蓄積され、事故等のリスクを上昇させるという報告がある [10]。そのため、屋内の運動環境においてもリスク軽減やパフォーマンス向上のために、温熱環境のコントロールや快適性の向上が必要であると言える。本研究では、温熱環境指標を用いる快適性向上を実現するため、快適性評価に必要な温熱パラメータ計測技術の提案・検証を行う。

一方でスキルを鍛えるトレーニングにおいては、トレーニングにおけるモチベーションのコントロールが課題となっている [11]。特に初心者のスポーツへの参加においては、上級者とのパフォーマンスのギャップが大きい、身体能力の向上が参加のモチベーションともなっている [6]。したがって、パフォーマンスのギャップを埋めつつ、スキル向上を実現する環境作りが重要となる。

一般にはスキル向上はコーチング等の手段で実現されるが、本研究では、リアルタイムな視覚・触覚刺激によるパフォーマンス向上を実現する、人間情報学的なアプローチをとる。近年の情報科学技術の発達により、高度なセンシング技術が比較的容易に利用可能になったことで、スポーツへの影響に関心が集まっている。本研究では、球技を対象として、視覚刺激・触覚刺激がプレイヤーのパフォーマンスにどのような影響を与えるのかを明らかにする。

1.4 関連研究

まず温熱環境コントロールにおいては、温熱快適性を推定するための快適性指数が用いられる。代表的な快適性指標としては不快指数があり、温度・湿度をパラメータにとる。欠点としては、個々人のパラメータが含まれないため、集団の平均的な感じ方を評価するのみといったように、利用方法が限られている。一方で、これらの指数の1つである予測平均温熱感 (PMV) は、そのパラメータが個々人毎に変化するため、各人の温熱快適性を評価できる。PMV は、温度・湿度・放射温度・風速に加え、運動強度と着衣量がパラメータとなっており、その温熱環境に不満足・不快さを感じる人の割合である PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied、予測不快者率) が算出される [12]。

PMV を計算するには、気温、相対湿度、平均放射温度、平均風速、着衣量、代謝量の6つのパラメータが必要である。PMV の計算式を次に示す。

$$\begin{aligned} PMV &= (0.303e^{-0.036M} + 0.028) * [(M - W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}] \\ H &= 3.96 * 10 - 8 * f_{cl} * [(t_{cl} + 273.4) - (t_r + 273.4)] - f_{cl} * h_c * (t_{cl} - t_a) \\ E_c &= 3.05 * 10 - 3 * [5733 - 6.99 * (M - W) - p_a] - 0.42 * [(M - W) - 58.15] \\ C_{res} &= 0.0014 * M * (34 - t_a) \\ E_{res} &= 1.7 * 10 - 5 * M * (5867 - p_a) \end{aligned}$$

ここで、 M は代謝量、 I_{cl} は着衣量、 W は機械的仕事量、 H は顕熱損失量、 E_{res} は呼吸による潜熱損失量、 C_{res} は呼吸による顕熱損失量、 E_c は皮膚面よりの蒸発熱損失量、 f_{cl} は衣類の表面積係数、 t_a は気温、 t_r 平均放射温度、 v_{ar} は相対風速、 p_a は水蒸気分圧、 t_{cl} 着衣表面温度である。例えば、空気温度 24.0 °C、平均放射温度 24.0 °C、平均風速 0.20 m/s、相対湿度 60.0%、代謝量 0 met、着衣量 1.0 clo のとき、PMV は 0.095、PPD は 5.2%となる。

着衣量や代謝量の利用については、自己申告値を使用して PMV を計算するため、リアルタイムな PMV 計測による温熱快適性の評価は実現困難である [13, 14]。

代謝量を計算する従来手法は、トレーニング種別と運動強度 (METs) との 1 対 1 対応表の利用 [15]、または酸素消費量を使用する算出 [16] が挙げられる。METs 対応表を使用する方法は、トレーニング種別と代謝量を大まかに区別するため、代謝量の算出分解能が大幅に低下する。酸素消費量を使用する算出では、計測対象者に呼吸ガス分析用のマスクを装着する必要があり、特に本研究のターゲットとしているスポーツトレーニングにおいて、呼吸機能や身体の動きを妨げてしまう欠点がある。したがって、本研究の目的達成のためには、低拘束な代謝量計測手法の検証が求められる。

一方で、スポーツにおけるパフォーマンスを向上させる研究においては、また、一般にスポーツへの参加モチベーションにおいて、自己効力感が大きく影響することがわかっている [17]。そのため、スキル向上を目的としたトレーニングの支援においては、モチベーション向上のための自己効力感の改善が重要となっている。

第2章 温熱快適性の向上

2.1 まえがき

第 1.3 章で述べた通り、一般に温熱環境は運動パフォーマンスに大きく影響することが知られている [9]。本章では温熱環境制御による運動時のパフォーマンス向上を実現するため、図 2.1 に示すシステムを提案する。図 2.1 に示す提案システムは、温熱環境指標 PMV を用いて温熱環境フィードバックをかけることで、屋内での運動シーンにおける過剰な熱ストレスを軽減または適切にコントロールし、身体的作業負荷を軽減することを目的としている。

提案システムに用いる温熱環境指標である PMV (Predicted Mean Vote, 予測温冷感申告) は、ISO 7730 [12] に定められており、人体にかかる熱負荷と人間の温冷感とを関連付けた温熱環境評価指数として、快適性を評価する指標として建築設計などの分野で用いられている [10]。PMV に代表される快適性評価指標は、人間社会の生活を豊かにするものとして今後の活用が期待されている [18]。

第 2.4 節にあるように、PMV を算出するためには、6 つのパラメータ (空気温度、相対湿度、平均放射温度、平均風速、着衣量、代謝量) が必要となる。しかし、提案システムで用い

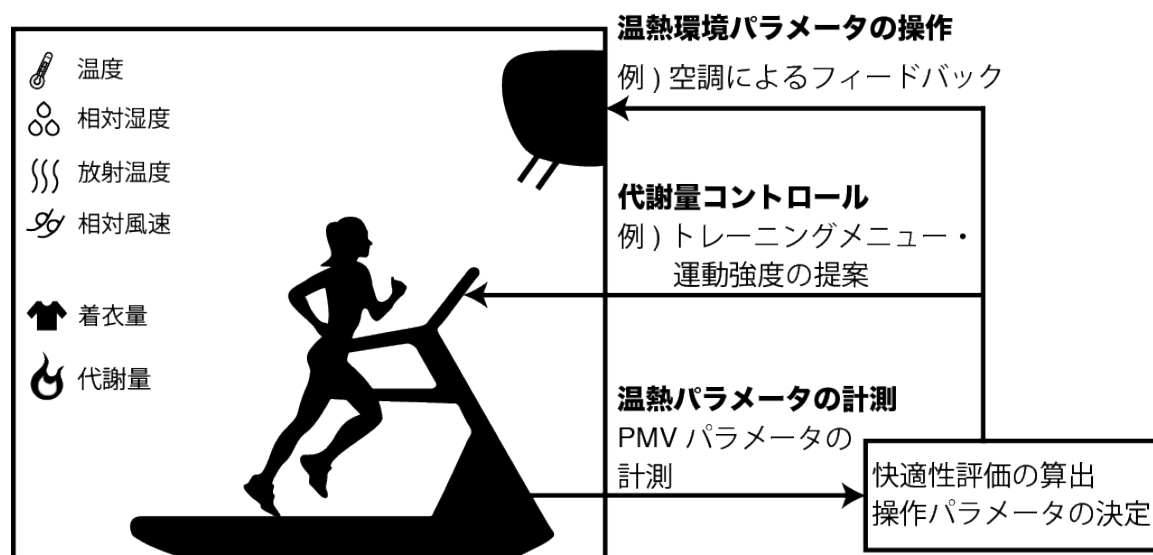


Figure 2.1: 提案する温熱環境コントロールシステム概要

る PMV の算出において、着衣量と代謝量については、提案システムに適用可能な計測技術が実用化されていない。そのため、提案システムに適した各パラメータの計測手法をそれぞれ考案し、実験を通じて実現可能性を検証した。

なお、本章における実験では、取得した実験データを個人を特定できない形で保存・分析している。また、本研究における有意水準は $p > .01$ とする。

2.2 着衣量計測

2.2.1 着衣量計測システム

PMV の算出に必要なパラメータのうち、着衣量は衣服ごとに発熱量を測定できるサーマルマネキンによってのみ測定されている [19]。この着衣量は着衣の熱抵抗値のことで単位は clo であり、SI 単位では Eq. 2-1 のように表される [20]。

$$1[\text{clo}] = 0.115[\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}] \quad (2.1)$$

サーマルマネキンは衣服の熱抵抗値を高精度に計測可能であるが、非常に高価であり、研究用途の域を出ない。また、サーマルマネキンは装着した衣服の着衣量を測定するため、人間が着用した状態の衣服を計測対象にできない。

また、着衣量の自己申告形式においては、サーマルマネキンによって計測された各着衣の clo 値を利用して算出する方法が ISO 9920 に規定されている [21]。ISO 9920 に定められている算出方法には、予め決まった着衣のセットから算出する方法と、各着衣の着衣量を総計する方法がある。例えばズボン、フレネルシャツ、T シャツ、ブリーフを着用した男性の着衣量を算出する場合、それぞれの方法で 0.61 clo, 0.89 clo と算出される。このときそれぞれの PMV は -0.422、0.134、PPD は 5.2%、16.1% と大きく誤差を生じてしまう。このように適切な申告値が得られない場合に大きな誤差が生じる可能性があり、さらにリアルタイムな計測が可能とは言えない。

人間が着用した状態で着衣量を計測することができれば、その場にいる人のリアルタイムな快適性評価を実現でき、オフィス空調におけるリアルタイムなフィードバックなど、PMV の活用の幅が大きく広がると考えられる。また、非接触に測定することができれば、ユーザーに低負荷なシステムが開発可能となり、さらに PMV の汎用性が高まると考えられる。

筆者はこれまでに、熱画像を用いる特徴量ベクトルによる着衣量推定 [22] を提案してきたが、予めデータセットを準備する必要がある、高い着衣量では誤差率が増大する課題があった。本節では着衣量の定義に着目し、データセットが不要で、かつ着衣量の大小に影響を受けにくい推定手法として、サーモグラフィーを用いる着衣の熱抵抗値推定手法を提案し、その実現に必要な着衣下体表面温度の推定手法について検討を行う。

2.2.2 システム評価実験

本実験では、人体の各部位の体表面温度に着目し、露出部位の体表面温度から着衣下の体表面温度を推定する手法を提案する。各部位の体表面温度の組み合わせに対して相関行列を計算し、相関係数が高い部位の組み合わせに対して考察する。それらの組の結果を元に、最小二乗法により求めた回帰直線を推定式として評価する。

提案する推定手法の検証のため、健康成人男性 15 名 (21 24 歳) に対して、サーモグラフィーによる熱画像撮影と、温度センサーによる体表面温度の測定を実施した。本実験で用いた実験系を Fig. 2.2 に示す。体幹部から末梢までの露出した各部位はサーモグラフィーで測定し、サーモグラフィーで測定できない着衣下体表面温度は温度センサーで測定した。サーモグラフィーは FLIR 社の FLIR E4 (解像度: 80×60 、熱分解能: 0.15°C)、温度センサーはセイコーエプソン社の S8100B (動作温度: -40°C $+100^{\circ}\text{C}$ 、再現性: $\pm 0.3\%$) を用いた。温度センサーは、着衣下の温度を安全に計測するため、また生体ノイズ低減のために、絶縁処理を施した。室温を 25°C に保った室内において、予め準備された規定の半袖 T シャツを 1 枚着用した状態で、サーモグラフィーによる熱画像の撮影及び温度センサーによる着衣下体表面温度の測定を行った。なお、本実験では 2 つの異なる機器により温度測定を行うため、計測方法に起因する誤差を抑えるよう、実験前にサーモグラフィーと温度センサーが同じ値を示すようにキャリブレーションをしている。

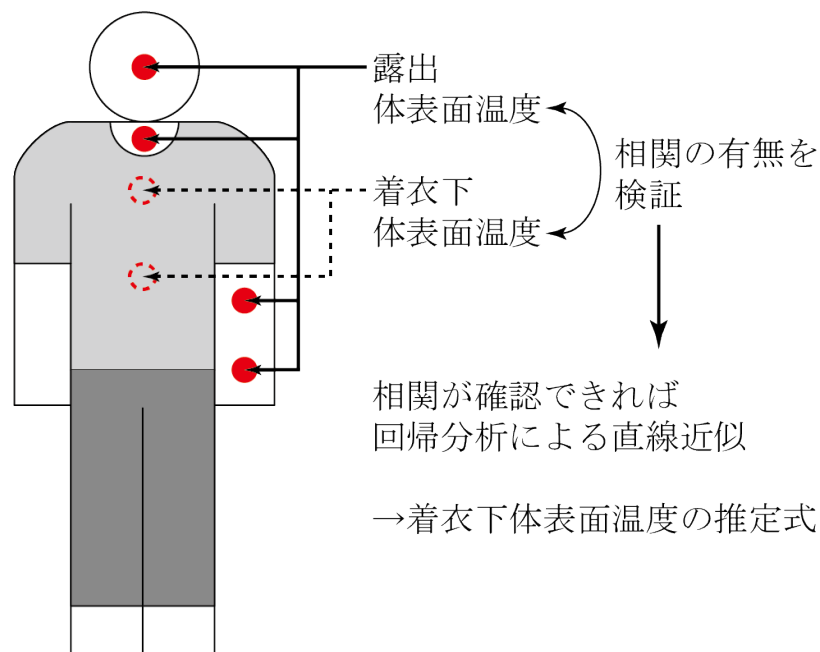


Figure 2.2: 着衣下体表面温度計測実験の概要

2.2.3 結果・考察

実験より得られた各部位の体表面温度を用いた相関係数と P 値を Figure 2.3, 2.4 に示す。Figure 2.3 で各部位の相関係数 R を見ると、Breast の温度を T_B 、Upper arm の温度を T_U 、Stomach の温度を T_S 、Neck の温度を T_N として、Eq. 2.2 のように表せる。

$$R_{(T_B, T_U)} = 0.8209, R_{(T_S, T_N)} = 0.8354 \quad (2.2)$$

となり、Breast は Upper arm と、Stomach は Neck と強い相関があることがわかる。Figure 2.4 において上記の組の P 値を見ると、これらの相関は有意水準 0.01 で有意であると言える。それぞれの組に対して最小二乗法により求めた回帰直線を Figure 2.5 と Eq. 2.3 に示す。

	Breast	Stomach	Face	Neck	Upper arm	Hand
Breast	1.0000	0.7299	0.3693	0.5250	0.8209	0.5515
Stomach	0.7299	1.0000	0.5585	0.8354	0.6972	0.5019
Face	0.3693	0.5585	1.0000	0.8231	0.6414	0.6691
Neck	0.5250	0.8354	0.8231	1.0000	0.6765	0.5176
Upper arm	0.8209	0.6972	0.6414	0.6765	1.0000	0.7644
Hand	0.5515	0.5019	0.6691	0.5176	0.7644	1.0000

Figure 2.3: 各部位の体表面温度を用いた相関係数 R

	Breast	Stomach	Face	Neck	Upper arm	Hand
Breast	1.0000	0.0020	0.1755	0.0445	0.0002	0.0331
Stomach	0.0020	1.0000	0.0305	0.0001	0.0039	0.0566
Face	0.1755	0.0305	1.0000	0.0002	0.0100	0.0064
Neck	0.0445	0.0001	0.0002	1.0000	0.0056	0.0482
Upper arm	0.0002	0.0039	0.0100	0.0056	1.0000	0.0009
Hand	0.0331	0.0566	0.0064	0.0482	0.0009	1.0000

Figure 2.4: 各部位の体表面温度を用いた相関係数における P 値

$$T_B = 0.440T_U + 20.271, T_S = 0.721T_N + 9.018 \quad (2.3)$$

Eq. 2.3 によるサーモグラフィーから得た熱画像を用いる着衣下体表面温度推定の妥当性について検討を行う。Eq. 2.3 で表される回帰直線の当てはまりの良さを示す決定係数 R^2 は、Eq. 2.3 の相関係数 R を 2 乗することで求められ、Eq. 2.4 のように表される。

$$R^2_{(T_B, T_U)} = 0.6979, R^2_{(T_S, T_N)} = 0.6738 \quad (2.4)$$

従って Eq. 2.3 に示す回帰直線は元のデータの 7 割程度を説明することができることとなる。また、Eq. 2.3 における元データの推定の標準誤差 S を Eq. 2.5, 標準誤差を含む着衣下体表面温度推定式を Eq. 2.6 に示す。

$$S_{BU} = 0.343, S_{SN} = 0.405 \quad (2.5)$$

$$T_B = 0.440T_U + 20.271 \pm 0.343, T_S = 0.721T_N + 9.018 \pm 0.405 \quad (2.6)$$

胸部と腹部の表面温度には内部相関が見られるため、Eq. 2.6 に示される推定式を用いてそれぞれ独立に推定する他に、露出部が限られている場合に、片方の推定式と内部相関を利用して胸部と腹部の着衣下体表面温度を推定可能である。ただし、内部相関を利用した推定手法では、独立に推定式を利用した場合に比べ、誤差が拡大する可能性がある点に留意が必要である。

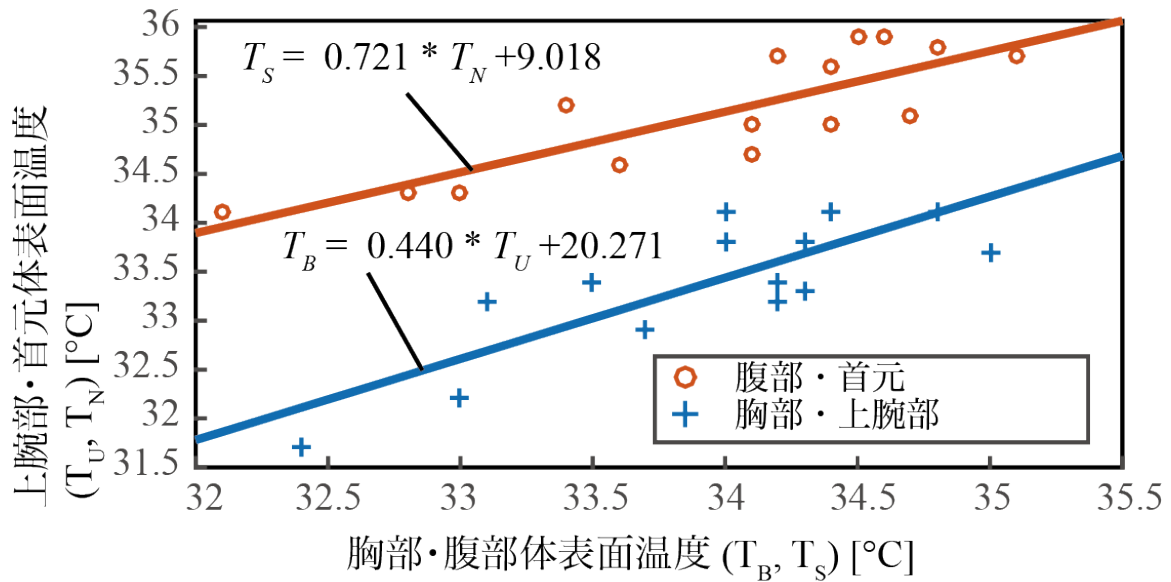


Figure 2.5: 最小二乗法により求めた胸部・腕部と腹部・首周りの体表面温度回帰直線

Figure 2.5 において直線とよくフィットしないデータが幾つか見られるが、今回の実験では被験者の上半身着衣のみを所定の着衣にしたことや、測定日が各データで異なり環境に対する生理的反応に差が生じたことなどが原因として考えられる。

本実験においては、運動時の着衣量の大きな変化が生じないと考え、運動前の安静時における着衣量計測での利用を想定したが、発汗による温度調節機能などを有する機能性着衣においては、運動中での見かけの着衣量が増加する可能性があるため、検証が必要である。

以上の結果より、サーモグラフィーを用いる着衣下体表面温度の推定は可能であると考えられる。

2.3 代謝量計測

2.3.1 代謝量計測システム

着衣量と同様に、代謝量の利用も ISO 7730 に規定されており [12]、従来手法では運動種別と対応する METs 表を用いて算出する [23]。例えば自転車エルゴメーターでの METs を算出する場合、特に強度を指定しない場合は 7.0 METs、30~50 W の低負荷の場合は 3.8 METs となる。空気温度 20.0 °C、平均放射温度 20.0 °C、平均風速 0.20 m/s、相対湿度 40.0%、着衣量 0.3 clo のとき、それぞれの PMV は 5.132、1.534 と算出され、PPD は 100%、52.7% と大きく誤差を生じてしまう。このように適切な運動種別が判断されない場合に大きな誤差が生じる可能性があり、さらにリアルタイムな計測が可能とは言えない。

本田ら (1989) によれば、1 回換気量と酸素消費量は、乳酸が生成されない低から中範囲の強度（この範囲は嫌気性閾値、AT 以下）と呼ばれる運動強度に比例する。したがって、この状態では呼吸商 (RQ) の値はほぼ一定である。さらに、「運動とスポーツの生理学」 [24] では、酸素消費量と運動強度、または代謝率は AT を下回ると比例すると明らかにされている。

本節では、図 2.6 に示すように、代謝量、酸素消費量、肺容量の関係を決定することを目的とする。代謝量は、AT 以下において、呼吸係数 RQ を比例係数として酸素消費量に比例する。同様に、1 回換気量は AT を下回る酸素消費量に比例するため、1 回換気量から代謝量を算出可能である。本章では、一回換気量測定を用いた代謝率推定法を提案した。呼気ガスの量と組成の測定は、酸素消費量と一回換気量を測定するための従来手法であるが、呼気成分計測

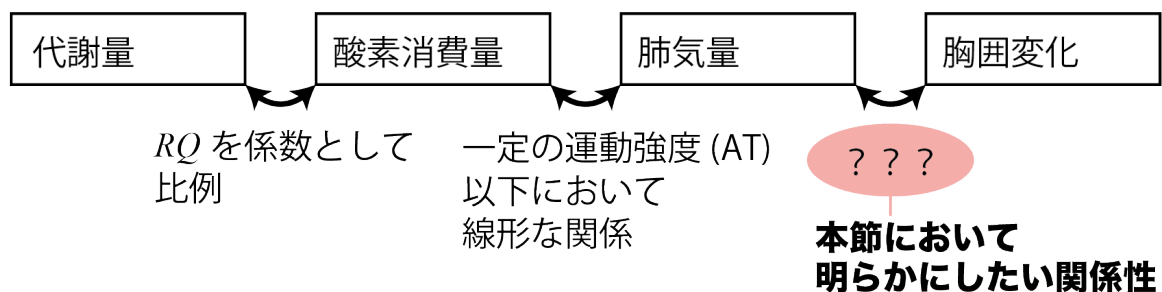


Figure 2.6: 胸囲変化を用いる代謝量推定の着眼点

マスクは身体の動きの自由を制限し、スポーツに於いては利便性・快適性を損なうため、図 2.1 に示す提案システムには適切であるとは言い難い。そこで本章では、肺容積測定のためのベルト式胸囲変化計測装置を提案する。提案システムは、呼気ガスを直接測定するのではなく、胸囲変化を測定するため、従来手法と比較して低拘束に肺容量を測定可能だと考えられる [25]。提案システムの実現可能性を評価するために、実験を通じて胸囲変化と肺容量の関係を検証した。

2.3.2 システム評価実験

図 2.1 に示す提案システムの評価のため、10 人の健康な学生（22～25 歳）に対して、提案システムを用いる胸囲変化計測と肺活量計による肺気量測定実験を実施した。実験条件を図 2.2 に示す。実験協力者は、図 2.2 (a) に示すように、脇の下にフィットするよう胸囲変化計測装置を装着する。体の測定ガイドラインに従って、提案システムを装着する位置と胸囲を定

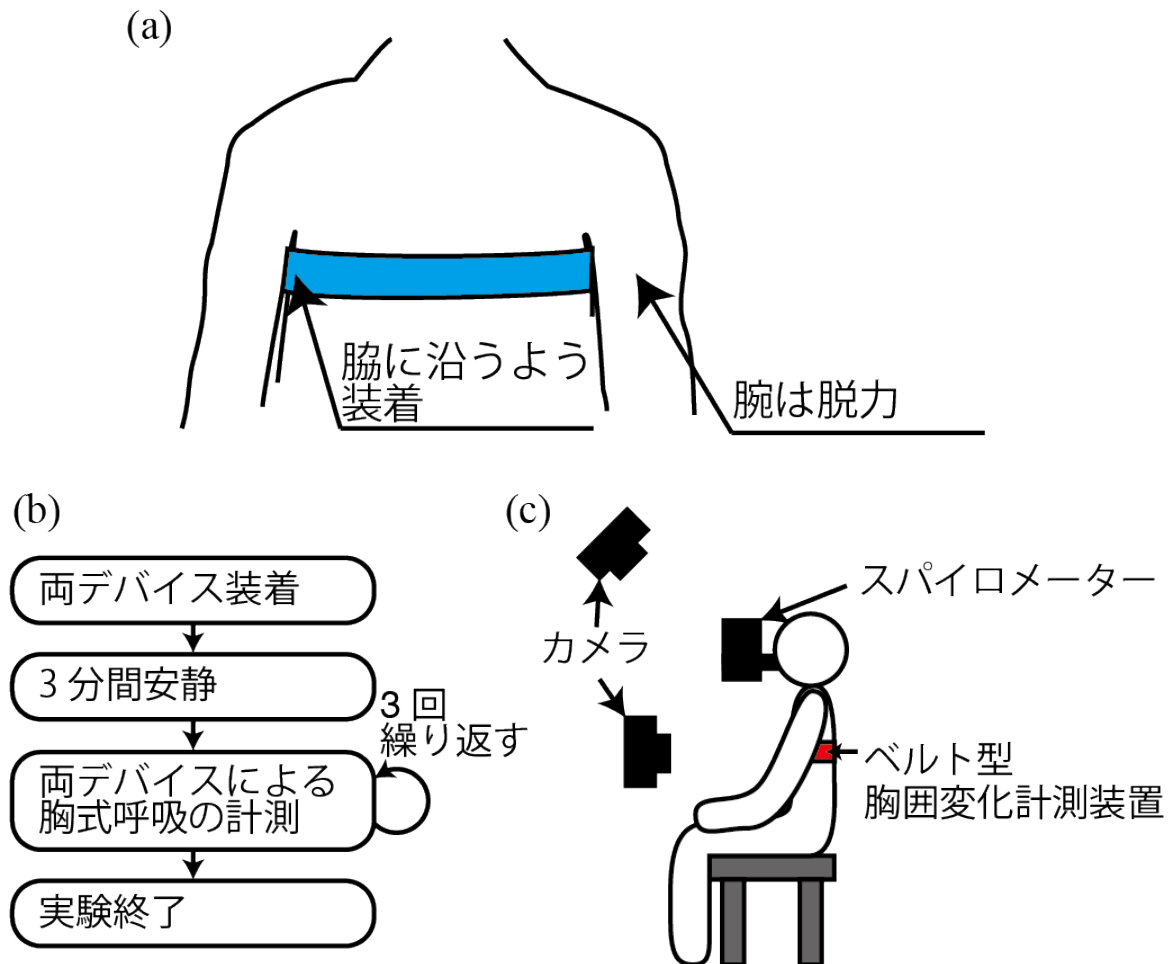


Figure 2.7: 胸囲変化・肺容量計測実験

義した [26]。実験手順を図 2.7 (b) に示す。実験協力者は、まずデバイス装着後 3 分の休憩をとり、3 回肺活量計に息を吐く。使用した肺活量計は電子的に接続できないため、光学カメラで肺活量計の値を記録した。肺活量計は、TTM Pocketable Spirometer KC (株式会社ツツミ) を用いた。実験では、実験協力者に胸式呼吸を行うよう指示し、開始点、中点、および終点で肺気量を測定した。データの記録点は 3 つのポイントを測定し、呼吸の中点を、肺活量計がその呼吸の肺容量の半分の値を示した瞬間として定義した。

2.3.3 結果・考察

図 4 に実験結果を示す。図 2.8 (a) は、各実験協力者の測定結果と線形回帰直線である。これより、肺気量と胸囲変化には強い負の相関あることが明らかになった ($p < 0.05$)。図 2.8 (b) に、その相関の決定係数を示す。すべての結果は 0.95 以上となった。したがって、図 2.8 (a) に示した線形回帰による直線近似は、胸囲変化と肺容量の関係をよく表していると考えられ

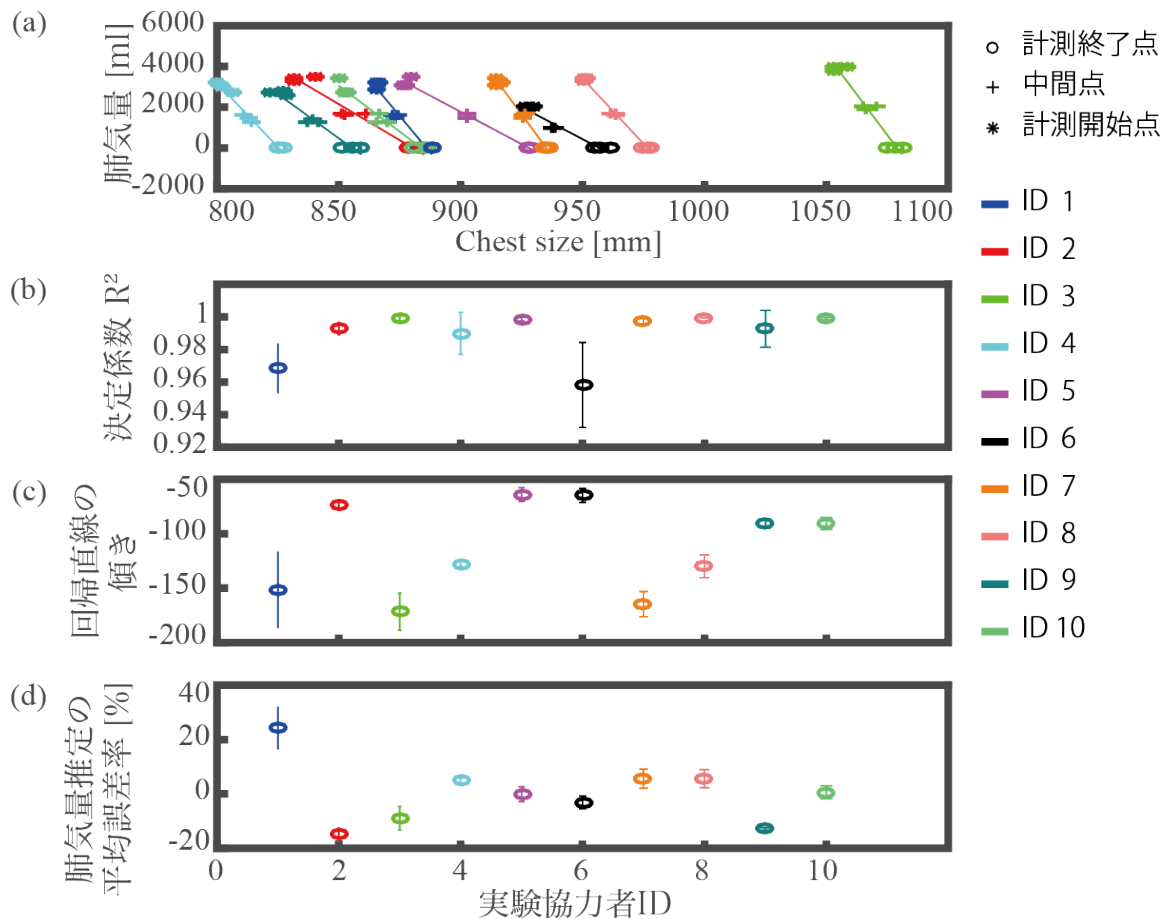


Figure 2.8: 胸囲変化・肺容量計測実験結果

る。図 2.8 (c) に、線形回帰直線の傾きとそれらの偏差を示す。直線の傾きは個々人によってばらつきがあるため、個人差があると推測される。一方で、各実験協力者内においては線形回帰直線の傾きは一定の傾向を示した。これを検証するため、線形回帰直線の傾きによる肺容量推定を実施したところ、推定の平均誤差率は 6.45%であった。このことから、ユーザーごとにキャリブレーションされた後であれば、胸囲変化から肺気量を推定可能であることが明らかになった。

線形回帰直線の傾きは、個人間の胸の大きさのばらつきと呼吸プロセスの違いのため、個人間で異なっていた。着目すべき点として、胸の大きさは胸の大きさの偏差ごとの呼吸量に影響を与えており、線形回帰直線の傾きのばらつきは、呼吸プロセスの個人差などの他の要因があることを示唆している。一部の実験協力者において線形回帰直線の傾きが大きく異なる理由は、提案システムでは腹式呼吸によって呼吸される空気量を測定できないためだと考えられる。提案システムを用いる推定においては平均肺容量を使用するため、実際には推定誤差の影響は小さくなると思われる。肺気量の推定精度を向上させるために、ウエストサイズの変化と姿勢測定用の複数のベルト型計測デバイスを使用することで、腹部呼吸の影響を考慮し修正可能であると考えている。

本章の実験結果より、肺容量推定のために提案システムを実際に適用するには、各ユーザーのキャリブレーションが必要であると考えられる。図 2.8 (c) は、線形回帰直線の傾きが一定の値に収束することを示しているが、図 2.8 の ID : 1 の場合など、傾きが収束しない場合は、長時間計測における平均値を用いることで推定精度が改善すると考えられる。図 2.9 に、想定されるキャリブレーション手順を示す。

提案システムを代謝量推定に用いる場合、システムは線形近似直線の傾きを使用する必要がある。提案システムによる肺容量の推定には、各呼吸サイクルにおいて 6.45%の誤差が含まれるが、これには複数回測定による誤差の軽減が有効である。また提案システムは AT を下回る条件での推定となるため、提案システムのターゲットは主に運動強度の低い長時間の運動になる。したがって、複数回測定による時間分解能の低下のデメリットは軽減されると考えられる。

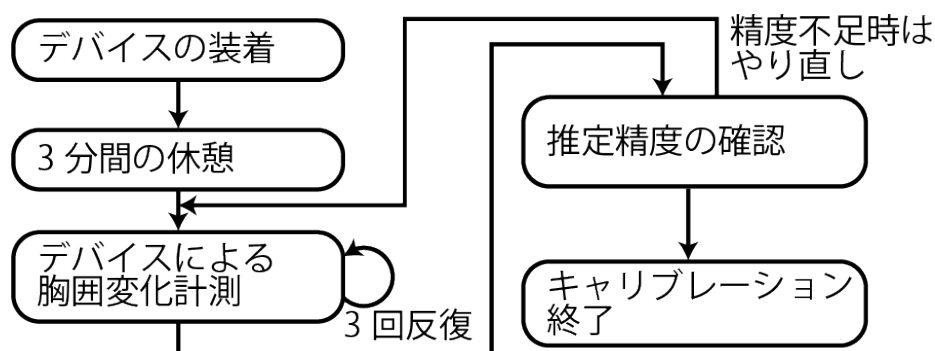


Figure 2.9: 想定されるキャリブレーション手順

2.4 まとめ

本章では、温熱環境のコントロールにより身体的作業負荷を軽減する提案システムの実現に向け、温熱環境の快適性評価に用いる PMV のパラメーターのうち、個人間で異なるパラメーターの着衣量・代謝量を対象とし、非接触的または装着負荷の軽い計測手法の提案と実現可能性の検証を行った。着衣量においては、着衣下体表面温度計測による着衣量推定手法を提案し、実験を通して推定式を導出することができた。また代謝量においては、ベルト式胸囲変化計測デバイスを用いる代謝量推定システムを提案し、実験を通して代謝量推定が平均誤差 6.45% の精度であることを明らかにした。なお、この 2 つの実験については、日本人の若年男性が実験参加者であり、安静状態において実験した点に留意が必要である。既存の温湿度計・放射温度計・風速計に加え、本章で用いたサーモグラフィーとベルト型胸囲変化計測装置を併用することで、熱画像を用いる着衣下体表面温度推定により着衣量が、ベルト型胸囲変化計測装置からは肺気量を元に代謝量がそれぞれ推定され、PMV のリアルタイムな算出が可能となる。

以上から、本章で提案した着衣量・代謝量の非接触的または装着負荷の軽い計測手法が、運動時のような精密な計測機器の装着が好ましくない環境においても活用できる可能性を見出したと言える。

第3章 作業負荷の低減

3.1 まえがき

スポーツは古くから人々の人生を豊かにする活動として親しまれてきた。その中でも、チームを組んで行うサッカーやバレーボールといった球技は、他者との一体感や達成感を共有し、人々に素晴らしい体験を提供してくれる。しかしながら、その球技経験が少ない人やブランクのある人のような、自己のパフォーマンスを低いと評価している人にとって、新たに球技を始める、再開するのは心理的なハードルが高い。パフォーマンスの低さに起因するミスがチーム全体の負けにつながり、他の人々の楽しみを減じてしまうと考えるためである。パフォーマンスを向上させる球技環境が構築できれば、初心者やブランクのある人でも球技を気軽に楽しめるような社会が実現できる。

球技のパフォーマンスに影響する要因の一つに、複数の情報を同時に処理しなければならない点がある。球技中にはボールの操作だけでなく、様々な情報処理を行っている。例えばサッカーでは、パスを出すことでボールを敵ゴールに運んでいく。これにはボールの操作と、敵や味方の位置関係を常に把握する必要がある。またバレーボールでは、ボールの落下地点を予測しながら、自陣や相手コート状況を把握し、味方にパスを出す、あるいは敵のいないところへボールを打つ。本研究では、ボール操作スキルと、試合中の状況認識スキルが複合したものをプレイスキルとし、ボール操作スキルは状況認識の負荷に左右され则认为する。その球技に慣れ親しんだプレイヤーであれば、ボールの操作はある程度自動化され、状況認識の負荷による影響は低くなるが、あまりその球技に慣れていないプレイヤーにとっては、これらの複数の情報処理が大きな負荷となり、結果としてパフォーマンスの低下が引き起こされる。

そこで本研究では、広く親しまれているサッカーに注目し、視覚刺激と触覚刺激を複合的に付与することでプレイヤーの状況認識パフォーマンスを支援するシステム(図 3.1)を構築する。我々は提案手法によって、プレイヤーの作業負荷を低減し、ボール操作へ集中させることができるため、結果としてパフォーマンスが向上すると考えており、評価実験によりこれを確認する。

これまでに、運動学習に視覚刺激提示を活用する研究はいくつか見られる。例えば、2本のスライダーを腕で動かすシンプルな実験課題において、視覚刺激提示により正確な運動学習が促進されることが報告されている [27, 28]。また、重心動揺計を用いるバランス感覚テスト [29] ではバランスの傾きを、整体治療の施術スキルの評価 [30, 31] では力のかけ方と頻度を、それぞれリアルタイムな視覚刺激によりフィードバックすることで、より理想的な動きへと

改善した。より複雑な動きの例として、スクリーン上でのジェスチャー学習 [32] では、実際の動きとの誤差を視覚刺激として提示することで提示方法により学習の程度が変化することが明らかになっている。

適切な視覚刺激提示は、実際のスポーツへの応用においてスキル向上に効果的であることが示されている [33]。モーションキャプチャにより得られた姿勢と理想的な姿勢との差を視覚的にフィードバックし、コーチングに活用するシステムや [34, 35]、ダンス中の姿勢を視覚刺激として提示することすることで、ダンスのスキルを向上させるシステムが実現されている [36]。球技においては、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いた投球の軌道予測支援が提案されている [37]。また、Wulf ら [38, 39] の研究においても視覚刺激提示による知覚支援により、運動中の知覚負荷が減少することが示されている。

次に、触覚刺激提示を用いる事例について述べる。広義の意味での触覚刺激には、力覚を提示するものと振動などによる触覚を提示するものの2種類がある。本研究では、後者の振動による触覚提示を行うタイプの触覚刺激を取り扱う。これまでに、触覚刺激を方向情報の提示に利用した研究は多数行われている。例えば、ナビゲーションシステム [40] や、シューティングゲームにおける味方の位置情報提示 [41]、スポーツにおけるコーチング支援 [42] などがその例としてあげられる。

スポーツ中に触覚刺激を提示する例としては、靴型振動デバイスを用いて体重のかけ方を



Figure 3.1: 視触覚刺激提示システムを稼働させた状態でサッカーをプレイしている様子

フィードバックすることで、クライミングのスピードが向上することがわかっている [43]。また、動き始めのタイミングと方向の提示に関しては、振動ベルトを用いるダンスの振付指導において、快適性が向上することが明らかにされており、[44]、脚部に装着した振動子によるスノーボードの学習支援においては、主観評価において触覚刺激提示による指導が口頭指導と比べて効果的であると報告されている [45]。これらより、触覚刺激提示はスポーツにおけるスキル向上に効果的であることが示唆される。

また、振動子を用いた航空機操縦のナビゲーションシステムに着想を得、漕艇におけるコーチングに振動刺激を適用・評価した研究では [46]、漕艇のタイミングの精度向上に加え、一部の振動提示手法においては心拍数の減少効果が見られており、触覚刺激提示はストレスの低減にも寄与する可能性があると考えられる。以上より、本研究で提案するリアルタイムな触覚刺激提示は、球技においても知覚負荷を下げ、スキルの向上につながると考えられる。

先述の視覚・触覚刺激提示で見られたのと同様に、視覚刺激提示と触覚刺激提示を組み合わせた視触覚刺激提示の作業負荷低減効果はドライビングシミュレーターにおいても見受けられ [47]、メタ・アナリシスにおいても肯定的である [48]。その他、視覚刺激と触覚刺激を複合的に提示することで、人間の情報処理の負荷を減少させる可能性があることはこれまでの研究で示されている [49]。その一方で、スポーツにおいてはダンスの姿勢 [50] やボート漕ぎの軌道 [51] のスポーツ指導に適用したものがあがるが、視触覚刺激提示が視覚・触覚刺激提示単体と比べて効果的であるとは言えないと結論付けられている。

以上のように、本研究で対象とする球技において、視覚・触覚刺激提示を組み合わせた場合の有効性はまだ明らかにされていない。そこで本研究では、一例としてサッカーを題材とした場合の視覚刺激・触覚刺激を設計・実装し、単独で提示した場合と組み合わせて提示した場合の比較により、球技における視覚刺激・触覚刺激の特性を明らかにする。

3.2 システムデザイン

3.2.1 システム概要

れまでに著者らは、床面投影を用いる予測軌道提示によるサッカーのプレイヤー支援システムを提案し、パスにおける反応時間の改善の評価を行ってきた [52]。また、ベルト型の振動提示デバイスを用いるコーチング支援システムを提案し、走行時でも振動による方向提示が可能であることを確認してきた [42]。本研究ではこれらを発展させ、球技の一例として、3-on-3 のサッカーを対象に、視覚刺激提示と触覚刺激提示を組み合わせた、プレイスキルを向上させるシステムを提案する。

サッカーではパスを繋いでいくことで相手ゴールを目指してボールを運び、ボールがゴールに入ることによって得点を獲得する。自分のチームが得点を獲得する、あるいは相手チームの得点を防ぐためには、ボールの操作と同時に敵や味方の位置関係を常に把握する必要がある。本研究では、この時の敵や味方の位置関係の把握を視覚・触覚刺激提示を利用し補助するようなシステムを提案する。提案システムを稼働させた状態でサッカーをプレイしている様子を図 3-1 に示す。サッカーではパスを防ぐために、ボールを持っている敵と自分をマークする敵の

間に動線が通ってるかどうかを瞬時に判断する必要がある。また、2人のプレイヤーを同時に視界内に捉えることは難しく、体の向きや首ふりを活用することで、両者の動きを捉える必要がある。そこで、提案システムでは、視覚刺激として同じチーム同士を線で結び、敵と味方の位置関係を提示する。また、触覚刺激としては視覚外の敵の位置をベルト型の振動提示デバイスにより提示する。これにより、他プレイヤーの位置情報に関する情報処理の負荷を下げ、ボールの操作に注力することが可能となり、球技のパフォーマンスが向上する事が考えられる。本研究ではスポーツ中のプレイヤーの位置や向きをリアルタイムに取得する必要があるため、体育館規模のモーショントラッキングとプロジェクションによる視覚刺激提示が同時に可能な設備の1つとして、大規模没入型ディスプレイである Large Space (図 3.2)[53] を利用し、システムの研究開発を行なった。

Large Space は天井部分に取り付けられた 22 基のモーションキャプチャカメラ (OptiTrack Prime 41) と 12 基のプロジェクタ (CHRISTIE MirageS+14K-M) により構成されるシステムである。プレイフィールドには、スポーツがプレイできるようにポリプロピレン (高衝撃共重合体) の床材が敷き詰められている。

Large Space ではモーションキャプチャシステム OptiTrack により、縦 15 m、横 25 m、高さ 7.7 m の空間で、再帰性反射マーカが付けられたプレイヤーやボールの動きをトラッキング可能である。プレイヤーの位置、および角度の取得には 4 個の再帰性反射マーカを取り付けた帽子から剛体を構成し行った。再帰性反射マーカを取り付けた帽子を図 3.3 に載せ

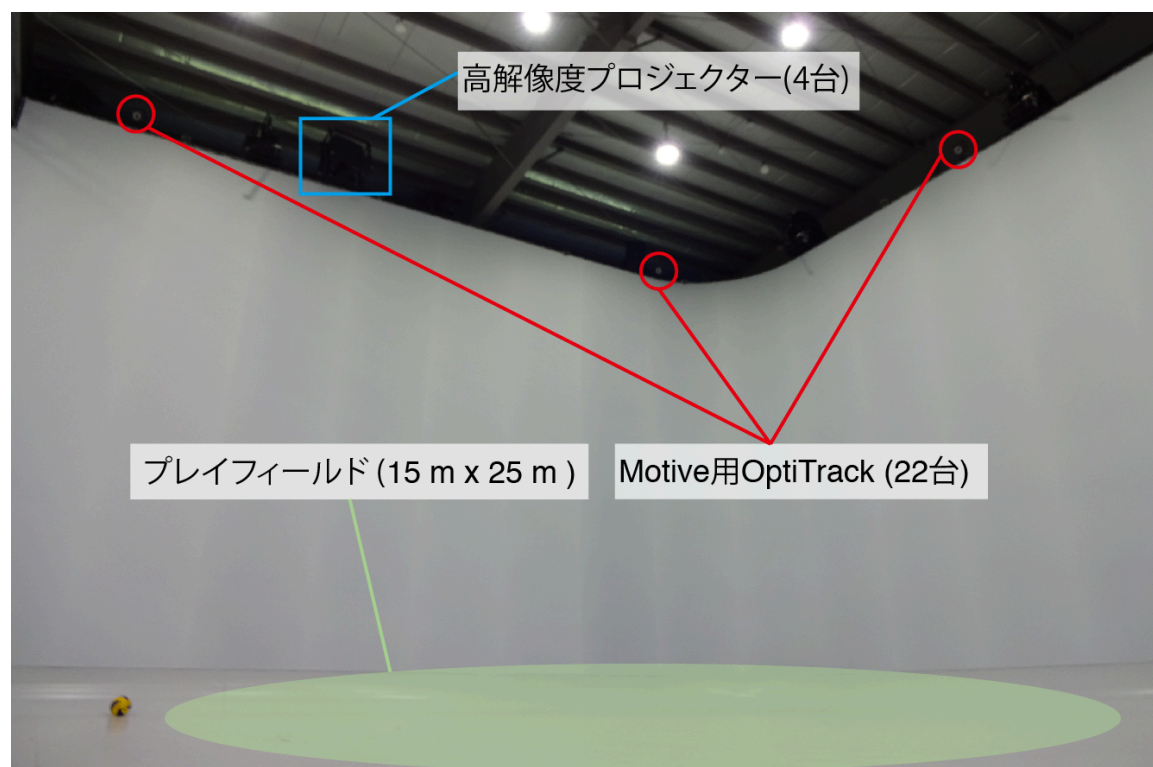


Figure 3.2: Large Space の設備概要

る。各帽子のマーカ―は一―意に識別可能であるように配置した。

22 基のモーションキャプチャカメラより得られた画像の同期、および 3 次元空間への変換、各剛体の id・位置・角度の取得には OptiTrack のソフトウェアプラットフォーム Motive を利用した。得られたプレイヤーやボールの id・位置・角度のデータは視覚・触覚刺激提示を行う際に利用する。本研究では Intel Core i7-4930K と NVIDIA GeForce GTX 780 より構成されるマシン上で Motive を動作させることで、120 fps でデータの取得が可能である。

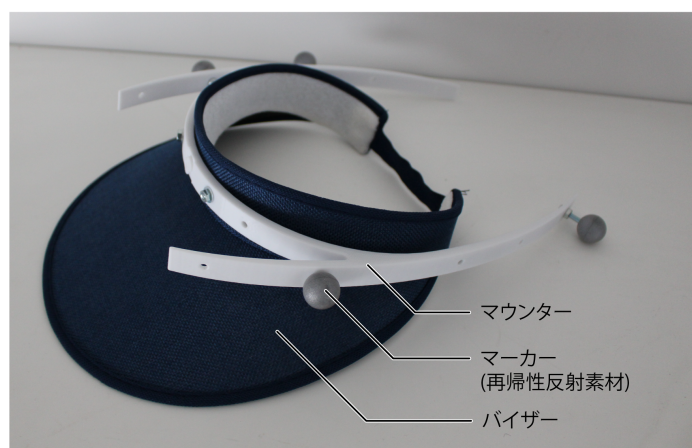


Figure 3.3: プレイヤーのトラッキングに用いる再帰性反射マーカ―を取り付けた帽子

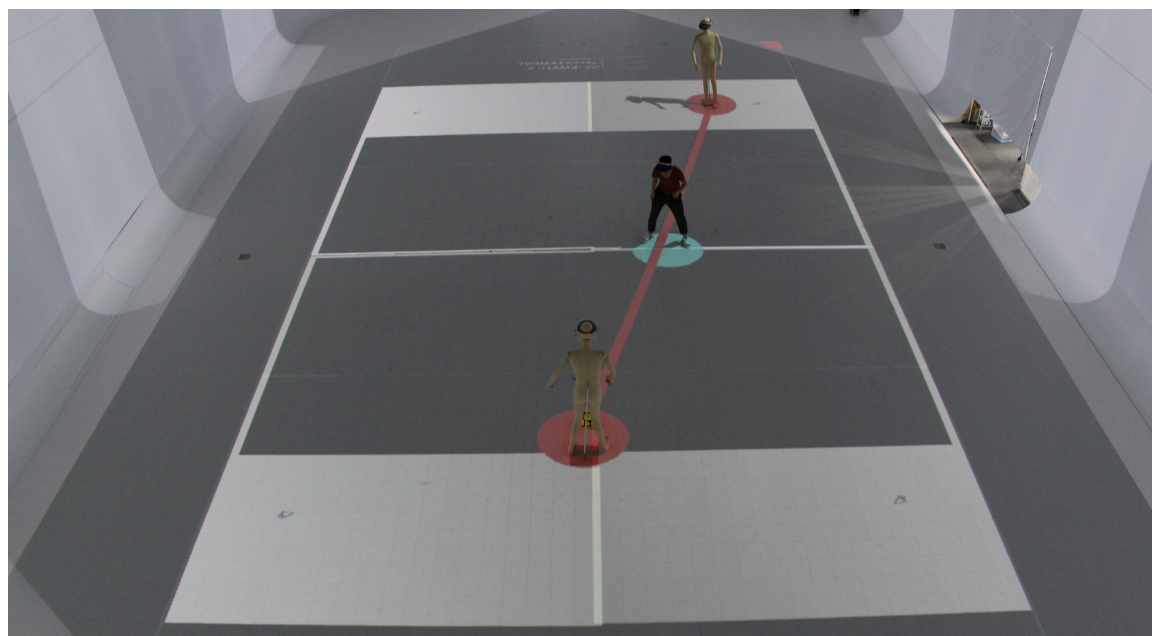


Figure 3.4: 提案システムによる視覚刺激提示例（偶数 id が 1 つ、奇数 id が 2 つの場合）

視覚刺激は、Large Space 内に配置されているプロジェクタを用いることで提示する。触覚刺激はベルト型の振動提示デバイスを用いることで提示する。それぞれの詳細は以下の節で述べる。

3.2.2 視覚刺激提示

本研究ではスポーツ中のプレイヤーに対する視覚刺激提示を行うため、プレイヤーの運動を極力阻害しないシステムである必要がある。代表的な視覚刺激提示システムとしては HMD が挙げられるが、デバイスの重量や、ディスプレイ位置がずれると立体視が難しくなること、球技スポーツにおける事故の危険性を考慮し、視覚刺激提示手法としてプロジェクターによる床面投影を採用した。

Large Space は、天井に取り付けられた 12 基のプロジェクターにより、壁面投影および床面投影が可能となっている。本章ではそのうち 4 台のプロジェクターにより床面投影を行い、Motive により得られた各剛体の id を利用して、ボールの軌道や、各チーム毎のプレイヤーの位置を色分けして表示する。

3.2.3 触覚刺激提示

触覚刺激提示に用いる振動提示デバイスの外観を図 3.5 に示す。提案システムでは、装着者の腰部に取り付けたベルトの振動子によって、背部の相手プレイヤーの位置を触覚刺激として提示する。

本デバイスは、マイクロコンピュータ (The Switch Science mbed HMR1017)、無線通信モジュール (XBee-PRO ZB)、バッテリー、および、13 個の振動アクチュエータ (T.P.C FM34F) で構成され、図 3.6 に示すように、ベルトによって腰部に装着して使用する。人の背部は腹部に比べて触覚の感覚器が少ないため [54]、背部に強く振動を与えるために、背部 (図 3.5、No.7) には 2 つの振動アクチュエータを取り付けた。装着者の腹囲には個人差があるため、腹囲 700 ~ 1000 mm まで対応可能とし、腹囲に合わせて各振動アクチュエータの位置を調節可能とした。バッテリーを含めたデバイスの重さは約 150 g で、最低 1 時間の連続使用が可能である。

振動させる位置は、約 30 m 離れた先のモーショントラッキング PC から無線通信によって送信される。図 3.7 に示すように、提案システムでは視野外のプレイヤーの方向を真後ろ、右側、左側の 3 方向に分けて提示する。デバイス装着者の頭部の正面方向に対する相手プレイヤーの角度を $\theta [^\circ]$ としたとき、 $-10^\circ \leq \theta \leq +10^\circ$ の場合には相手プレイヤーが真後ろにいると判断し、 $+10^\circ < \theta \leq +180^\circ$ の場合には右側、 $-180^\circ \leq \theta < -10^\circ$ の場合には左側と判断する。相手プレイヤーが装着者の真後にいる場合は 7 番、右側にいる場合は 4~6 番全て、左側にいる場合は、8~10 番全てを振動させる。 $+180^\circ < \theta$ または $\theta < -180^\circ$ の場合には場合には、装着者自身で相手プレイヤーを認識することができるため触覚刺激を提示しない。



Figure 3.5: 振動提示デバイスの構成



Figure 3.6: プレイヤーが振動提示デバイスを装着した様子

3.3 ボール軌道可視化

3.3.1 ボール軌道可視化システム

サッカーのプレイングの観点から見ると、ボールの軌道を予測する能力は重要なスキルの1つであり、正確さと反応速度が求められる。例えば、ゴールキーパーは多数のプレイヤーの動きに同時に注意を払う必要があるため、ゴールキーパーには、プレイヤーの位置と動きの認識スキルが求められる。

そこで本節では、図 3.1 に示すようなボール軌道可視化システムを構築した。提案システムは、LargeSpace に備え付けの 22 台のモーションキャプチャカメラ OptiTrack と、4 台のプロジェクターを使用する。LargeSpace は、高さ 7.7 m、幅 25 m、長さ 15 m の空間に、高精度トラッキング機能とフロアプロジェクション設備を備えた、世界最大級の没入型 VR ディスプレイである。

モーショントラッキングシステム (Optitrack with Motive) により、赤外線反射性素材のマーカを貼付・装着したボールとプレイヤーの位置と方向を取得する。ここで、各プレイヤーを区別するために、3D プリントマウンター (図 3.3) を作成した。このマウンターには 6 つのマーカ取り付け穴があり、マーカの 3 次元的位置の組み合わせがプレイヤーごとに固有となるように取り付けることで、各プレイヤーの ID を識別している。

パスにおけるボール弾道の予測パフォーマンスを向上させるために、ボールとプレイヤーの

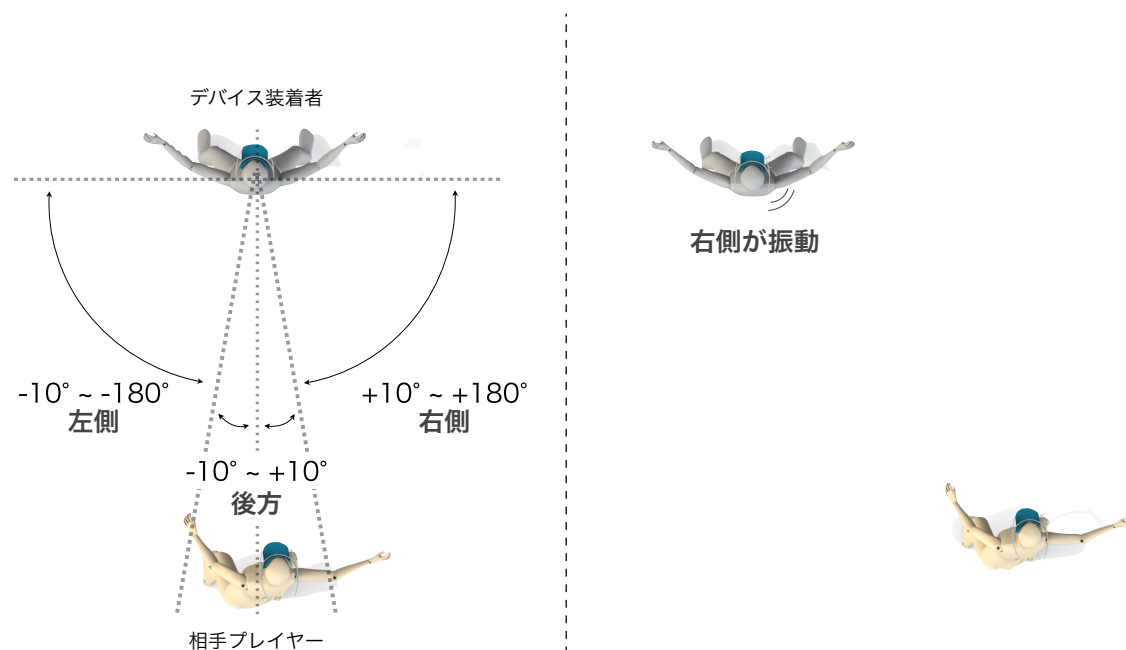


Figure 3.7: デバイス装着者と相手プレイヤーとの相対的な位置関係に応じた振動提示デバイスの動作

位置・方向を視覚化するプロジェクションシステムを開発した(図 3.8)。本システムは、直前のボールの位置と速度から計算された予測弾道を LargeSpace の床面に投影する。LargeSpace 内では、最大で 6 人のプレイヤーが同時にシステムを利用できる。3 人のプレイヤーがシステムを利用したときを図 3.4 に示す。

また、ボールと同様にプレイヤーの方向も投影する。プレイヤーは弾道だけでなく速度も予測するため、ボールおよびプレイヤーから伸びる弾道予測線の長さを、それぞれの速度を表すようにした。図 3.8 に、対象がそれぞれ停止(図 3.8(a))、ゆっくりな移動(図 3.8(b))、素早い移動(図 3.8(c))でのボールの弾道予測線の例を示す。

予測弾道のレンダリングは OpenGL によって管理され、コンピュータクラスター内の 4 台のコンピュータ (CPU : Intel Core-i7 4790K、GPU : NVIDIA Quadro K5000) がレンダリングを実行する。各コンピュータは、Motive から得たトラッキングデータを元に、各プロジェクターに割り当てられた領域をそれぞれレンダリングする。システムデータシート上では、トラッキングエラーは 1 mm 未満である。

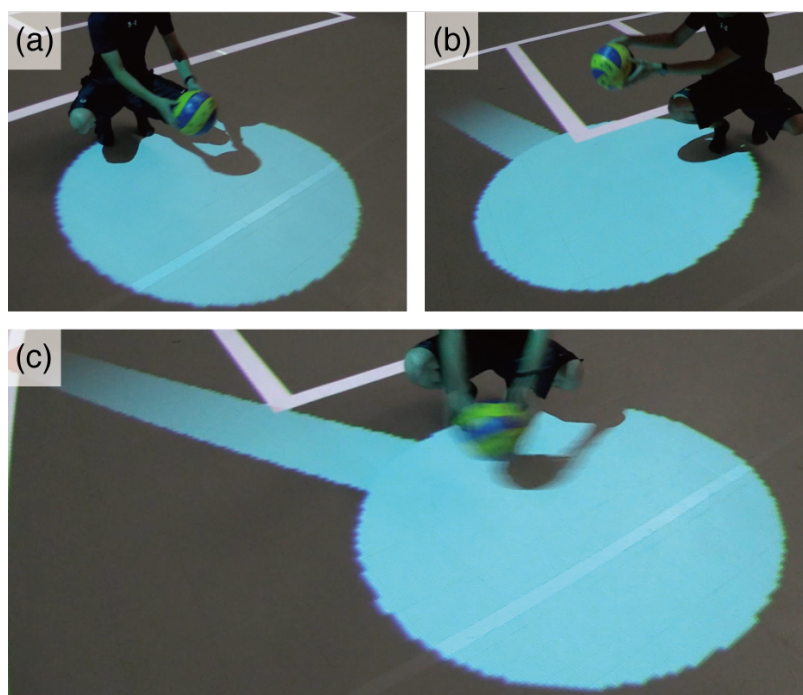


Figure 3.8: ボール軌道予測線の実装結果

3.3.2 システム評価実験

提案システムのパフォーマンス向上における有効性を明らかにするため、システム評価実験を実施した。サッカーにおけるパフォーマンスの差は、ボール弾道予測の速さと視野の広さの2つが大きく影響していると考えられる。ボール弾道予測のスキルは、提案システムの有無を比較することによって確認でき、視野の広さは、パスを正面または有効視野外から受けた場合の比較により確認する。

これらの要因における提案システムの有効性を評価するために、ボールを蹴り出した瞬間から、正面または有効視野外からパスを受ける場合の初期反応までの反応時間を記録した。本実験では、反応時間を「実験参加者がパスに反応して一歩目を踏み出すまで」とした。

8人の健康成人男性（22～25歳）が実験に参加し、図 3.9 に示される実験手順で実施した。

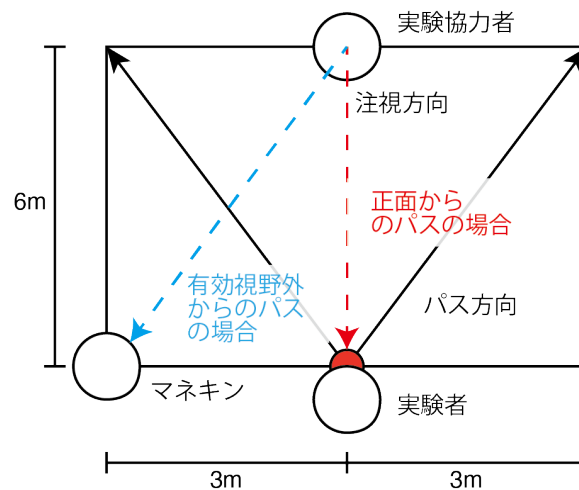


Figure 3.9: 弾道予測線提示システムの評価実験環境

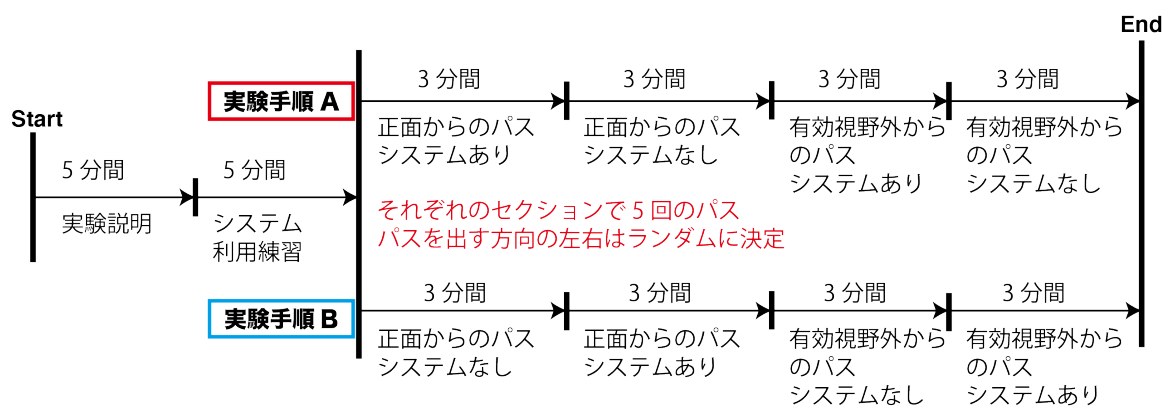


Figure 3.10: 弾道予測線提示システムの評価実験手順

実験協力者は2つのグループに分けられ、順序効果を避けるために、各セクションの実験条件の順序を入れ替えてカウンターバランスを取った。

実験は各手順で4つのセクションに分割され、各セクションで実験実施者は6 m 離れた場所から実験協力者の左側または右側にランダムにボールを20回パスした。有効視野外からのパスの条件下では、図 3.9 に示すように、実験協力者の右前方に配置されたマネキンを注視するように指示した。この際のパス到来方向はマネキンから左方26°の位置にあり、有効視野は最大で20°程度とされている [55] ことから、球技での有効視野を訓練していない実験協力者に対しては、十分に有効視野外であるとした。実験者3名による予備実験においても、パスに対する反応が大きく遅れることを確認している。なお、実験協力者の反応時間に影響を与えないよう、各試行におけるボールの速度の差を最小限に抑えるように配慮し、動画から速度差が小さいことも確認した。

3.3.3 結果・考察

システムの有無および注視方向の2条件における反応時間を図 3.11 に示す。2元配置分散分析を行ったところ、システムの有無と注視方向の相互作用は見られなかったが、システムの有無 ($F(1,7) = 30.877, \eta^2 = 0.1520$) と注視方向 ($F(1,7) = 138.203, \eta^2 = 0.1675$) にはそれぞれ大きい効果量が確認できた。視界外からのパスの平均反応時間は、システムを使用する場合と使用しない場合の両方で、すべての参加者の正面から通過する場合と比較して114 msec 長くなる。一方、提案システムにより、反応時間は平均で88 msec 短縮された。

2元配置分散分析の結果は、提案システムがパスを受ける際の反応時間を有意に改善することを示している。したがって提案システムは、ボールのパスにおけるパフォーマンス、つまり

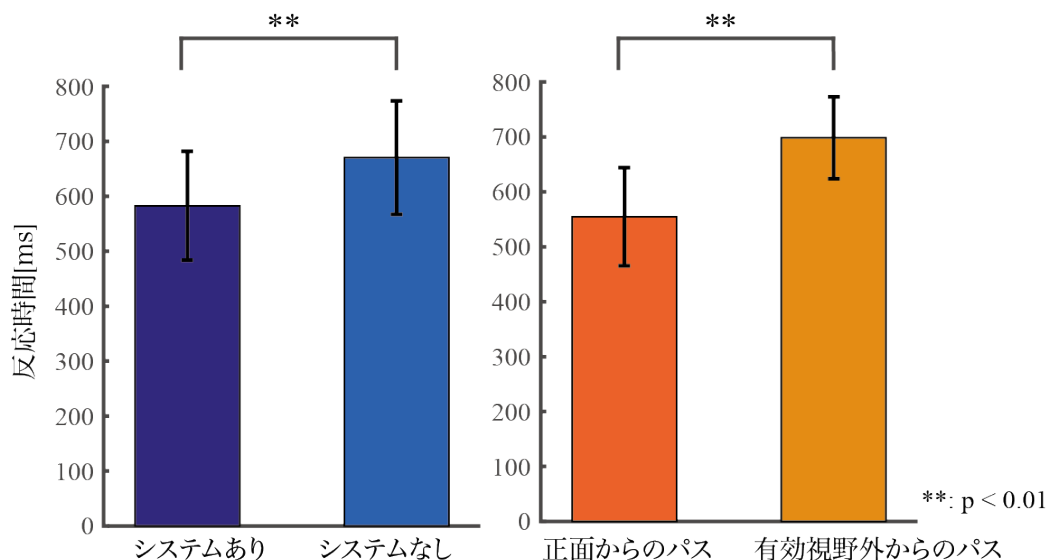


Figure 3.11: 弾道予測線提示システムの評価実験結果

サッカーにおける重要なプレイングにおけるパフォーマンスを向上させることができる。また本実験の実験協力者は、日常的に運動・スポーツをしないと回答していることから、提案システムは低パフォーマンスな初心者プレイヤーにも効果的であると言える。一方で、上級者は足の振り方や視線からパスを蹴り出す方向を蹴り出すより前に予測できる可能性があり、蹴り出したあとに提示される弾道予測線の認識速度向上効果が期待できないと考えられる。

正面からパスされる場合と有効視野外からパスされる場合の反応時間は同様に改善したが、有効視野外からのパスにおいては、音や有効視野外での動きを認知してから、中心視野においてボールの動く方向を認識している実験協力者の様子が確認された。したがって、本実験における反応速度の短縮は、中心視野近傍における認識速度の向上が支配的であると考えられる。

以上の結果から、視野の広さに対する提案システムの有効性は確認することができなかったが、パス到来に対する反応速度の向上が確認されたことより、提案システムは球技中の注視方向に対する状況認識のパフォーマンスを向上させたと言える。

3.4 視野外情報提示

3.4.1 視野外情報提示システム

ここでは、各プレイヤーの位置をプレイヤーの頭を中心として直径 1 m の円を描画し、id が奇数の場合には青色、id が偶数の場合には赤色で表示を行う。更に偶数 id 同士、あるいは奇数 id 同士を線で結ぶことにより、敵と味方の位置関係を視覚的に知ることが可能となる。図 3.4 に実際の視覚刺激提示の例を示す。

3.4.2 システム評価実験

本実験では、これまで先行研究では評価されてこなかった、球技における視覚刺激がプレイスキルに及ぼす影響を評価するため、サッカーにおける代表的なプレイの 1 つとして、パスカットを想定した実験を行った。実験協力者として、18 名の健康な男女 (23.0 ± 1.6 歳、男性：17 名、女性：1 名) を対象にした。なお、被験者のサッカー経験の内訳は、経験のない初心者が 16 名、ブランクのあるサッカー経験者が 2 名であった。

図 3.12 に本実験の概要を示す。図 3.12(a) のようにパスを出す役 A、パスされたボールを受け取る役 B、パスをカットする役 C を 1 名ずつ配置し、役 A、役 B、役 C は全て実験協力者が担当した。役 A と役 B の距離は 12 m とし、役 A、役 B はエリア Y 内を、役 C は左右のみ移動可能とした。役 A から役 B へのパスを役 C がカットできるかどうかを計測し、1 試行あたりのパスの回数は 20 回とした。役 C は最大努力でパスされたボールをカット、および保持するように指示し、役 A、役 B には最大努力で役 C にカットされないようにパスを出すよう指示する。その時に、役 A は役 C の頭上を越すようなパスは出さないこととした。

パスカットのスコアは表 3.1 のように定義した。提案システムによる状況認識スキル向上に加え、ボール操作スキルの向上をパスカットスコアとして評価するために、パスカット時

のボール保持を役 C に指示し、ボール保持の可否をスコアの重み付けとして導入した。また、本来は役 B が取るはずだったボールが跳ね返り、役 A がキープできた場合は、パスカットを失敗としてカウントした。

実験手順を図 3.12(b) に示す。実験協力者は 3 人 1 グループとなって実験を行い、実験説明と準備運動を十分行ったのち、役 A～C を振り分けた。下記の条件 1～4 におけるパスカットを練習したのち、各条件下でパスカット 20 回の試行を 1 ブロックとして、各ブロックが終わるたびに役 C は作業負荷を評価する NASA-TLX[56] の日本語版 [57](表 3.2) に回答した。NASA-TLX への記入を終えた段階で役割をローテーションする。全ての実験協力者が役 A～C を担当し、合計 12 ブロックを終えた時点で実験を終了とした。実験終了後には提案システムを利用したパスカットについてインタビューを行った。なお、提案システムの効果だけを抽出するために、すべての条件はデバイス装着状態でいき、また、順序効果をなくすため、4

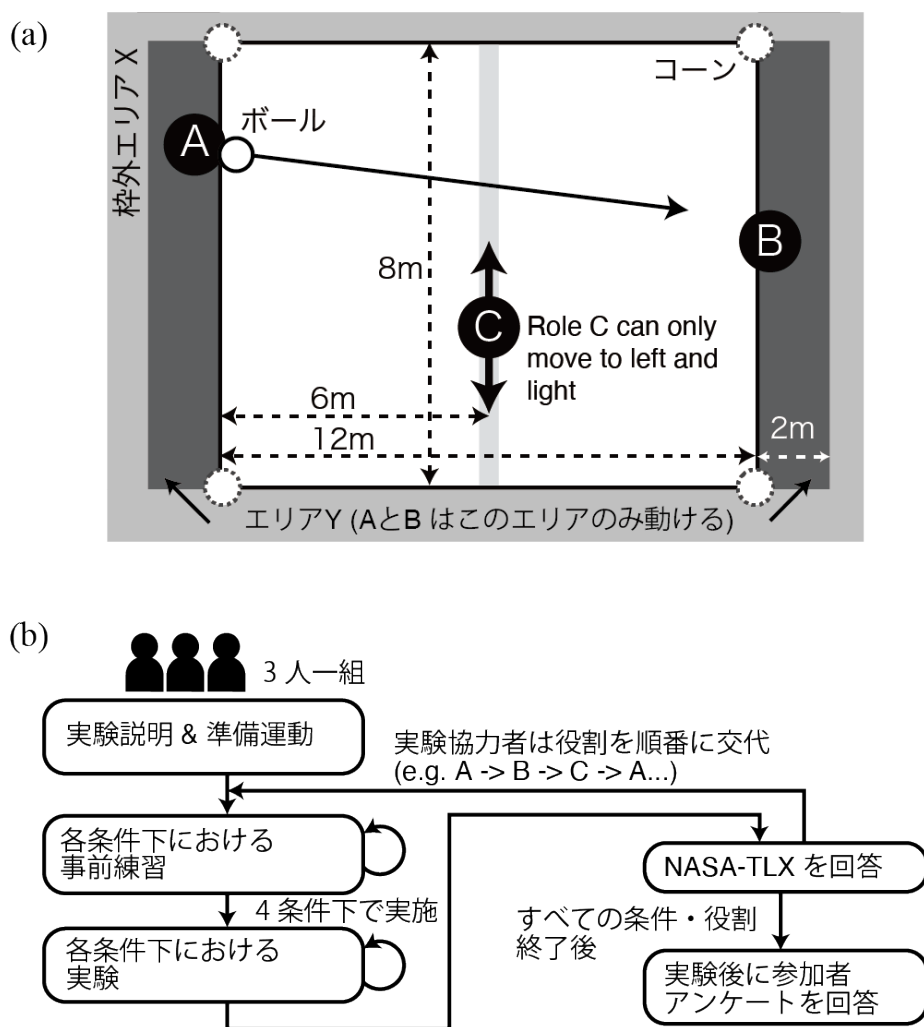


Figure 3.12: 視野外情報提示システムの評価実験概要

条件の試行順序はカウンターバランスをとった。
以下に各条件の詳細を示す。

- 条件 1：視覚・触覚刺激提示ともになし
マーカー帽子を装着。床面にパスカット実験のコートのみを描画する。
- 条件 2：視覚刺激提示あり・触覚刺激提示なし
役 A と B はマーカー帽子を装着する。役 C には役 AB 間を結んだ線を視覚的に提示する。
- 条件 3：視覚刺激提示なし・触覚刺激提示あり
役 A～C はマーカー帽子を装着し、役 C のみが振動提示デバイスを装着する。役 C には後方にいる役 B の方向を触覚的に提示する。
- 条件 4：視覚・触覚刺激提示ともにあり
役 A～C はマーカー帽子を装着し、役 C のみが振動提示デバイスを装着し、役 C には

表 3.1: パスカットスコアの算出方法

点数	条件
0	A or B がボールをキープした
0.5	ボールが枠外 X に出た
1.0	C がボールをキープした

表 3.2: NASA-TLX における質問項目

Q1, 知的・知覚的負荷 どの程度の知的・知覚活動（考える、決める、計算する、記憶する、見るなど）を必要とするか、課題が易しいか難しいか、単純か複雑か、正確さが求められるか大ざっぱでよいか
Q2, 身体的負荷 どの程度の身体的活動（押す、引く、回す、制御する、動き回るなど）を必要とするか。作業がラクかキツイか、ゆっくりできるかキビキビやらなければならないか、休み休みできるか働き詰めか
Q3, タイムプレッシャー 仕事のペースや課題が発生する頻度のために感じる時間的切迫感はどの程度か。ペースはゆっくりとして余裕のあるものか、それとも速くて余裕のないものか
Q4, 作業成績 作業指示者（またはあなた自身）によって設定された課題の目標をどの程度達成できたか。目標の達成に関して自分の作業成績にどの程度満足しているか
Q5, 努力 作業成績のレベルを達成・維持するために、精神的・身体的にどの程度いっしょうけんめいに作業しなければならないか
Q6, フラストレーション 作業中に、不安感、落胆、いらいら、ストレス、悩みをどの程度感じるか。あるいは逆に、安心感、満足感、充足感、楽しさ、リラックスをどの程度感じるか

後方にいる役 B の方向を触覚的に提示する。また、役 AB 間を結んだ線を視覚的に提示する。

本実験では、以下の指標により、提案システムの有効性を評価した。

1. 作業負荷：表 3.12 に示した日本語版 NASA-TLX により評価を行い、尺度は 20 段階とした（最大 100 点）
2. パスカットスコア：パス 1 本ごとの得点を表 3.13 のように定義し、1 ブロック（20 回のパスカット）を総じた点数を評価した（最大 20 点）

3.4.3 結果・考察

パスカットスコアを図 3.13 に示す。各条件下におけるパスカットスコアの平均はそれぞれ、条件 1（視覚・触覚刺激提示ともなし）は 9.14、条件 2（視覚刺激提示あり・触覚刺激提示なし）は 11.83、条件 3（視覚刺激提示なし・触覚刺激提示あり）は 11.06、条件 4（視覚・触覚刺激提示ともにあり）は 11.25 となり、条件 2 が最も高く、条件 1 が最も低いスコアとなった。視覚刺激提示の有無と触覚刺激提示の有無を要因として 2 要因分散分析を行ったところ、視覚刺激提示と触覚刺激提示の交互作用が見られた ($F(1, 17) = 9.398, \eta^2 = 0.0347$)。単純主効果の検定を行ったところ、触覚刺激提示なしの場合に視覚刺激提示の有無 ($F(2, 34) = 9.872, \eta^2 = 0.0408$)、視覚刺激提示なしの場合に触覚刺激提示の有無 ($F(2, 34) = 18.088, \eta^2 = 0.0806$) に有意な差がみられ、後者のほうが効果量が大きかった。

次に、NASA-TLX で評価された作業負荷の結果を図 3.14 に示す。まず、トータルの作業負荷 (3.14(a)) について視覚・触覚刺激提示による相互作用が見られた ($F(1, 17) = 9.315$)。単純主効果の検定を行ったところ、触覚刺激提示なしの場合に視覚刺激提示により有意に負荷が下がり、中程度の効果がある ($F(2, 34) = 10.459, \eta^2 = 0.0966$)。また、視覚刺激提

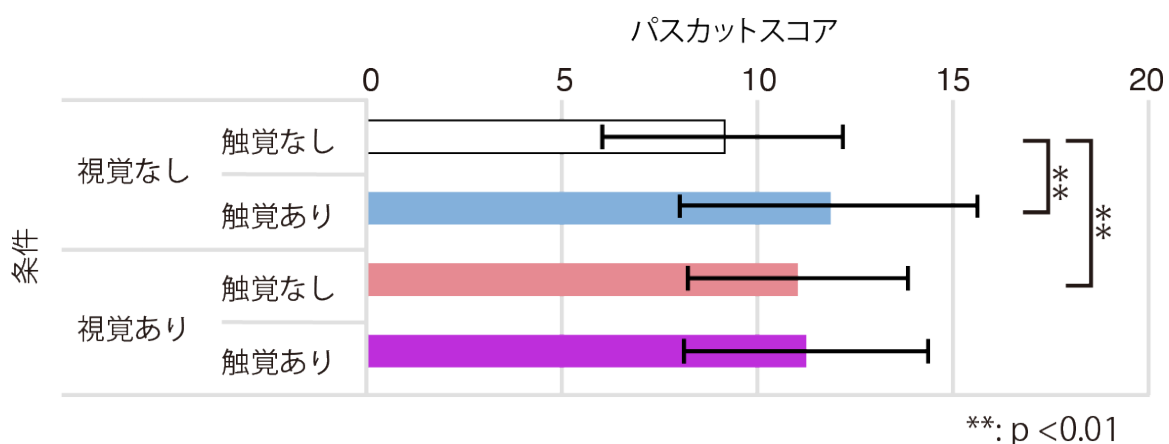


Figure 3.13: 各条件下におけるパスカットスコアの平均

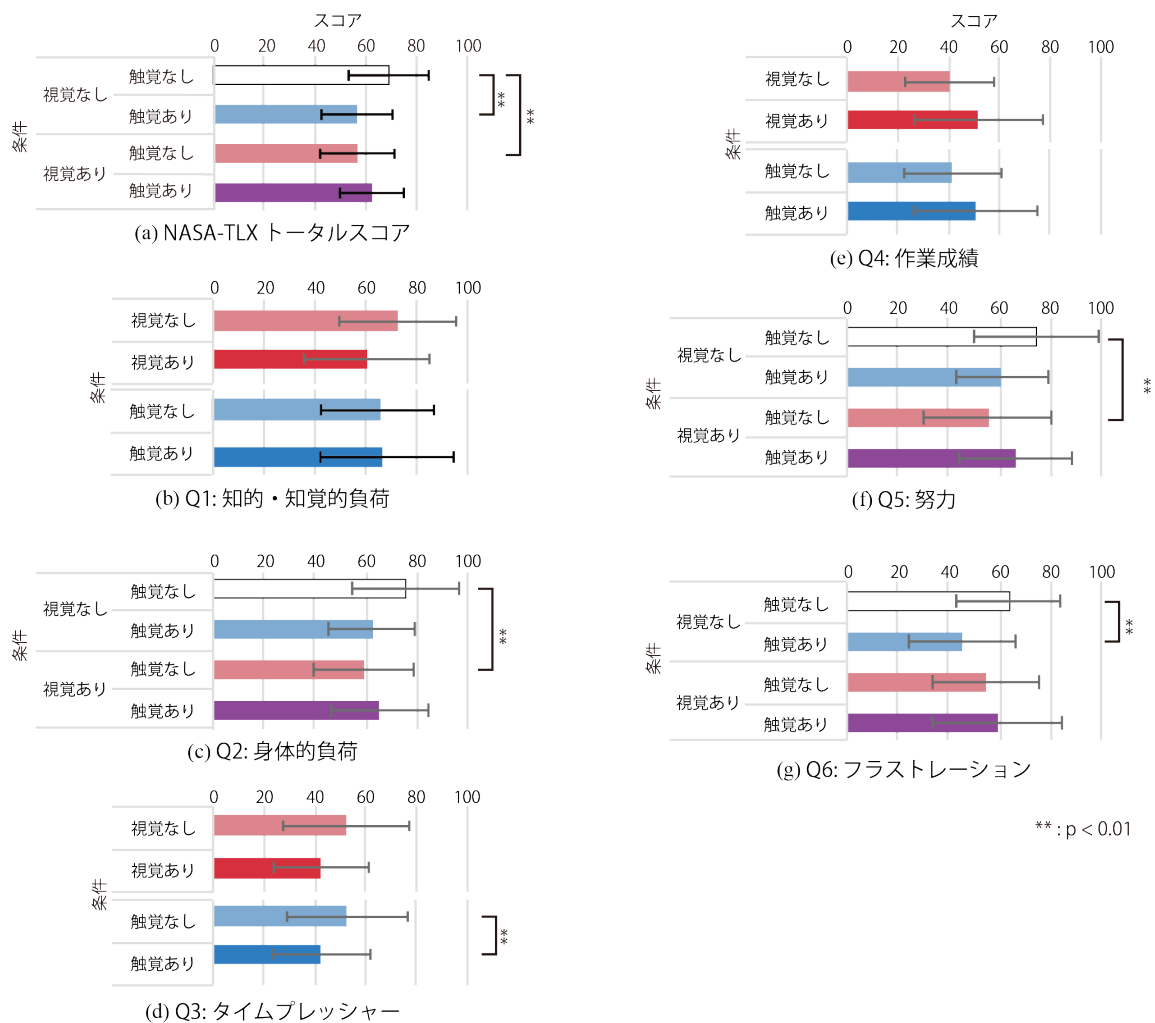


Figure 3.14: NASA-TLX スコアの平均 (a) NASA-TLX トータルスコア, (b) Q1: 知的・知覚的負担, (c) Q2: 身体的負担, (d) Q3: タイムプレッシャー, (e) Q4: 作業成績, (f) Q5: 努力, (g) Q6: フラストレーション

示なしの場合には触覚刺激提示により有意に負荷が下がり、同じく中程度の効果が見られた ($F(2, 34) = 11.721, \eta^2 = 0.0878$)。

同様に、各質問についても視覚刺激提示の有無と触覚刺激提示の有無を要因として2要因分散分析により分析した結果を図 3.14 (b)~(g) に示す。Q1:知的・知覚的負担においては、視覚・触覚刺激提示の有無には有意差が見られなかった。Q2:身体的負担においては、視覚・触覚刺激提示の交互作用は見られなかったが ($p > 0.01, F(1, 17) = 6.450, \eta^2 = 0.0578$)、単純主効果の検定を行ったところ、触覚刺激提示なしにおける視覚刺激提示によって有意に負荷が下がっていた ($F(1, 17) = 10.583, \eta^2 = 0.0295$)。Q3:タイムプレッシャーにおいては、触覚刺激提示において負荷が有意に減少した ($F(2, 34) = 9.428, \eta^2 = 0.0500$)。Q4:作業成績

においては、視覚・触覚刺激提示の有無には有意差が見られなかった。Q5:努力においては、視覚・触覚刺激提示の交互作用が見られ ($F(1, 17) = 10.452, \eta^2 = 0.0668$)、触覚刺激提示なしにおける視覚刺激提示により有意に負荷が下がった ($F(1, 17) = 10.975, \eta^2 = 0.0822$)。Q6:フラストレーションにおいては、視覚・触覚刺激提示の交互作用が見られなかったが、($p > 0.01, F(1, 17) = 8.368, \eta^2 = 0.0589$)、単純主効果の検定を行ったところ、視覚刺激提示なしにおける触覚刺激提示により負荷が下がっていた ($F(1, 17) = 9.258, \eta^2 = 0.0414$)。

図 3.13 で示されるパスカットスコアの平均より、刺激なしの場合と比較して視覚刺激と触覚刺激の単体での提示はプレイスキルの向上に効果があると言える。一方で、視覚・触覚刺激提示ともにありの条件と他の条件を比べたときには有意なスコア向上は見られなかった。

これは、初心者やブランクのあったプレイヤーにとって、視覚刺激と触覚刺激を併用することで逆に負荷が上がったためだと考えられる。NASA-TLX のトータルスコアを見ると、同様に、視覚刺激提示のみ、あるいは触覚刺激提示のみにより負荷が有意に下がっており、この結果と合致する。

Q1:知的・知覚的負荷においては、触覚刺激提示の有無による負荷の低減には有意差が見られなかった。視覚刺激提示は背後のプレイヤーとの位置関係を直感的には表せておらず、触覚刺激提示は「背後のプレイヤーの位置を振動提示デバイスから感じ取る」という作業が新規であることから、知的・知覚的負荷を有意に低減しなかったと考えられる。

Q2:身体的負荷においては、触覚刺激のどちらかがある場合のみ、有意に負荷が下がった。システムなしや視覚刺激提示の場合と比べ、触覚刺激提示は相手プレイヤーに察知されず、フェイントなどの運動量が増えるプレイングが減り、パスカットの動きが最適化されるため、身体的負荷が低減されたと考えられる。

Q3:タイムプレッシャーにおいては、触覚刺激提示が有意に負荷を下げる結果となった。パスカットにおけるタイムプレッシャーは、パスが来るタイミングの予測であると考えられ、触覚刺激提示による相手プレイヤーの位置情報の提示が、パスを出すチャンス（ここでは、相手プレイヤー役 A~B 間の間に役 C がおらず、動線が通っている状態）を表し、役 C がパスのタイミングを予測するのを支援したためと考えられる。

Q5:努力においては、触覚刺激提示のみ、有意に負荷を下げた。触覚刺激提示により、知覚できる情報が拡張されたことで、ミスプレイに対するプレッシャーを軽減できた可能性がある。

Q6:フラストレーションにおいては、視覚刺激提示がない場合には触覚刺激提示が有意に負荷を低減した。これは、視覚刺激提示が相手プレイヤーにまで知覚されてしまうために、視覚刺激提示が共有された前提のプレイングを必要とされるのに対して、触覚刺激提示は役 C のみに提示されることが原因であると考えられる。

本章では、状況認識の負荷が高くなることにより、初心者プレイヤーがボール操作に集中できなくなると仮定した。実験の結果、今回提案した視覚および触覚刺激提示を独立して用いることで、パスカットタスク中の作業負荷を低減でき、パスカットスコアが向上することを確認した。パスカットスコアの平均においては、視覚・触覚刺激の単体での提示が最もスコアが高く、NASA-TLX のトータルスコアにおいても同様に、視覚・触覚刺激を単体で提示した場合に有意に作業負荷が低減されたことから、本実験においては視覚・触覚刺激単体で

の提示が最も目的を遂行したと考えられる。

その一方で、視覚刺激と触覚刺激を組み合わせて提示した場合は、有意な負荷の低減およびパフォーマンスの向上は見られなかった。2.2 節でも述べた通り、視覚情報と触覚情報の単体での提示においては効果が認められるものの、併用されると効果が低減するという現象は、関連研究 [50][51] においても指摘されており、今回対象とした球技においても、この現象を確認したことになる。Nakamura らが提案した舞踊簡易学習システム [50] においては、触覚刺激提示がタイミング、視覚刺激提示が理想的な動きを提示している。一方、本研究では、2つの刺激提示が共に相手プレイヤーとの相対的な位置情報を提示していた。よって、Nakamura らのシステムと同様に、本システムにおいても、各刺激が提示する情報が重複しないように設計することで、視触覚刺激提示による負荷低減の効果が改善する可能性がある。これについて、今後より詳細な分析を行いたいと考えている。

3.5 まとめ

本章では、ボール軌道可視化と視野外情報提示という2つのアプローチで、球技中におけるパフォーマンス向上を実現し、視野外情報提示においては作業負荷が軽減されることを確認した。まず、ボール軌道可視化システムにおいては、ボールの弾道を床面にプロジェクションする視覚刺激提示が、パスを受けるタスクにおいてパフォーマンス向上に効果があることを明らかにした。続いて視野外情報提示システムにおいては、視覚刺激と触覚刺激を複合させたシステムの構築と実験による評価を通じて、サッカーのパスカットタスクにおけるパフォーマンスと作業負荷への影響を明らかにした。

視覚刺激提示と触覚刺激提示により、球技中の状況認識の負荷を下げ、ボール操作に集中できる環境を作ること、球技中のパフォーマンスを向上させるシステムを提案した。これは視覚刺激と触覚刺激の提示により、人間の情報処理の負荷を減少させる可能性があるとして先行研究より着想を得たものである。提案システムは球技の一例としてサッカーを対象とし、視覚刺激として相手プレイヤーの位置関係を、触覚刺激として視野外の相手プレイヤーの位置を提示した。

提案システムを用いた実験により、これまで先行研究では評価されてこなかった、球技における視触覚刺激提示による作業負荷の低減、および、パフォーマンス向上への寄与を評価した。実験の結果より、今回提案した視覚刺激提示、および触覚刺激提示を独立して用いることで、作業負荷低減効果が得られることを確認した。しかしその一方で、視覚刺激提示と触覚刺激提示を組み合わせた場合は作業負荷が上がり、パフォーマンス向上には寄与しないことが明らかとなった。

これらの結果により、スポーツにおける視触覚刺激提示というアプローチが、球技中のプレイヤーのパフォーマンスに与える影響を明らかにしたと言える。

第4章 結論

4.1 研究成果の概要

運動時のパフォーマンスは様々な要素に影響されるが、本研究は温熱快適性と作業負荷の影響に着目し、その両面からユーザーの運動を支援するシステムの開発を目的とした。

2章では、温熱環境に起因する作業負荷が運動時パフォーマンスを低下させる点 [9] に着目し、温熱環境を適切にコントロールするシステム (図 2-1) を提案した。提案システムの実現には、温熱環境を評価する温熱指標 PMV の利用が必要となるが、PMV のパラメータである着衣量と代謝量の計測において、リアルタイムかつ低拘束に計測可能な手法がない点が課題であった。まず着衣量計測については、着衣の熱抵抗値から起算可能な点に着目し、サーモグラフィーを用いる着衣下体表面温度推定手法を提案するとともに、実験により実現可能性を検証した。その結果、露出体表面と着衣下体表面の温度に相関がある部位があることを明らかにし、着衣下体表面温度の推定式を導出するに至った。次に代謝量計測については、一定の運動強度以下において肺気量と代謝量に相関がある点に着目し、ベルト型肺気量計測デバイスを用いる低拘束な肺気量計測による代謝量推定手法を提案し、実現可能性を検証した。実験の結果、同一実験協力者内では胸囲変化と肺気量が直線的な関係にあり、ベルト型肺気量計測デバイスにより代謝量が低拘束に推定できることが明らかになった。なお、この2つの実験については、日本人の若年男性が実験参加者であり、安静状態において実験した点に留意が必要である。これらの結果から、提案する温熱環境コントロールシステムに必要な技術の実現可能性を示したと言える。

3章では、初心者のパフォーマンスの低さが、スポーツへの参加に対する心理的障壁になっていると考え、参加のモチベーションを向上させるために、作業負荷の低減によるスポーツにおける一時的なパフォーマンス向上を実現するシステムの開発を目的とした。上級者のようなボールの弾道予測や背後のプレイヤーの位置予測が可能となるよう、視触覚刺激による知覚拡張システムを開発・実装した。まずボールの弾道予測線表示においては、モーショントラッキングシステムを活用し、未来のボールの弾道を床面にプロジェクションすることで可視化するシステムを構築した。実験を通して、本システムの視覚刺激により、パス到来への反応速度が平均 88msec 改善することを明らかにした。次に視野外情報提示においては、視野外の相手プレイヤーの位置情報を、床面プロジェクションによる視覚刺激と、ベルト型振動デバイスによる触覚刺激により提示するシステムを構築した。パスカットタスクによる実験の結果、NASA-TLX とパスカットスコアの評価により、パフォーマンス向上と作業負荷軽減効果を明らかにした。

2章と3章で提案されたこれらのシステムを併用することで、その両側面から運動時パフォーマンスを向上させる環境が構築可能である。例として、熱ストレスにより初心者の運動パフォーマンスが低下しないよう、適切な空調により温熱快適性をコントロールしつつ、ベルト型振動デバイスにより視野外のプレイヤーやボールの位置情報を提示することで、球技における運動パフォーマンスをさらに向上させるといった利用のシチュエーションが想定される。

以上から、本研究では温熱快適性の向上と運動時作業負荷の低減によるパフォーマンス向上技術の実現可能性を示した。本研究の成果は初心者のスポーツに対する動機づけや、プロアスリートのより高効率なトレーニング環境実現などのスポーツ分野に貢献するものとする。

4.2 残された課題

本研究に置いて、残されている課題は下記のとおりである。まず、温熱環境コントロールシステムの構成要素については検証を行ったが、実際に作業負荷を軽減するに至るかの検討が残されている。先行研究に示されているような、温熱快適性の向上による作業負荷軽減効果が、主観的・客観的側面の両面から検証される必要がある。

本研究で扱った温熱快適性指標 PMV は、一定運動強度以下の室内での利用を想定した指標であり、運動時の快適性評価には信頼性が十分でない可能性がある。その場合は、SET*などの指標と比較し、適切な温熱快適性指標を利用すべきである。

また、視覚・触覚刺激提示システムについては、試合中の一時的なパフォーマンス向上を実験により明らかにしたが、本システムによるトレーニング効果や、継続利用後のスキル評価については追加の検証が必要である。実験参加者が初心者を対象にしたものであったため、プロプレイヤーに対する効果についても、同様に追加の検証が必要である。

視覚・触覚提示については、本研究においてはそれぞれ一種類の提示方法のみの実装となったが、ひとえに視覚・触覚刺激と言っても膨大な手法が存在する。提示デバイスの改良、提示する情報の中身、提示人数の制限・拡張など、さまざまな要素の改善によりさらなる効果向上が見込まれると考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、筑波大学システム情報系 教授 水谷孝一先生には、指導教員として研究計画から論文執筆および発表まで、多くのご指導をいただきました。幾度と進路を悩みながらも最終的には自身の思い描くキャリアパスにたどり着くことができたのも、ひとえに先生に頂いた指導のおかげと感じております。

筑波大学システム情報系 准教授 若槻尚斗先生には、実験計画の詳細やシステム実装での課題、論文執筆等にて多くのご指導・ご助言をいただきました。研究以外の面でも、様々な議論を交わす機会をを数え切れないほど頂きましたが、代えがたい貴重な時間だったと感じております。

筑波大学システム情報系 助教 善甫啓一先生には、研究のアイディアから実験実施に至るまで、具体的なご指導を頂きました。遠方での学会発表の際にも、多くの地域研究にお誘いいただき、人生で二度ない経験をさせて頂きました。

筑波大学システム情報系 准教授 海老原格先生には、研究内容に対するご指導もさることながら、日々の研究生活において多方面からご支援をいただきました。快適な研究室生活の実現にご尽力頂き、充実した5年間を過ごさせて頂きました。

筑波大学システム情報系 助教 前田祐佳先生には、日頃より研究に関して多くのご意見をいただきました。人を計測する共通点から、多くのご指導を頂きました。

博士論文審査においては、副査として筑波大学芸術系 教授 山中敏正先生、人間系 教授 綾部早穂先生にご指導をいただきました。異分野からの鋭いご指摘を頂き、エンパワーメント情報学プログラムの柱である分野横断的な視点を養うことができました。

エンパワーメント情報学プログラム Project Based Research においては、産業技術総合研究所 大槻麻衣氏(前・エンパワーメント情報学プログラム 特任助教)、およびプロジェクトメンバーの 白石僚一郎氏、佐藤晃矢氏に多大なる尽力を頂きました。異分野複合チームでありながら、研究成果を世に出すことができ、有益な経験となりました。

筑波大学音響システム研究室では、ときには研究に全く関係ないことばかりしている自分にも、学生の皆様には暖かく接していただきました。特に、エンパワーメント情報学プログラムの同期である糸井川氏には、多くの迷惑をかけながらも様々な場面でフォローしていただきました。また、研究室同期の岩谷氏、味藤氏には、学外での貴重なイベントにお誘いいただいたり、学術的なワークショップの運営を補佐していただいたりと、多方面でお世話になりました。

最後になりますが、博士課程へ進むことを快諾し支えてくれた家族と妻に深く感謝します。

参考文献

- [1] レイモン・トマ, 蔵持不三也訳. 新版 スポーツの歴史. 白水社, 1993.
- [2] 特定サービス産業動態統計速報 (2019 年 10 月). 経済産業省, 2019.
- [3] 猪飼道夫, 金原勇, 石川利寛, 松田岩男, 松井秀治, 小川新吉, 広田公一, 窪田登, 山川純. 現代トレーニングの科学, 1968.
- [4] 猪飼道夫, 金原勇ほか. 学校体育と現代トレーニング. 大修館, 昭, Vol. 43, p. 317, 1968.
- [5] 矢部京之助, 草野勝彦, 中田英雄. アダプテッド・スポーツの科学: 障害者・高齢者のスポーツ実践のための理論. 市村出版, 2004.
- [6] Basil Ashford, Stuart Biddle, and Marios Goudas. Participation in community sports centres: motives and predictors of enjoyment. *Journal of Sports Sciences*, Vol. 11, No. 3, pp. 249–256, 1993.
- [7] 大築立志. 力のグレーディング. *Jpn. J. Sports Sci.*, Vol. 8, pp. 663–667, 1989.
- [8] 荒木雅信. これから学ぶスポーツ心理学. 大修館書店, 2011.
- [9] Stephen S Cheung. Interconnections between thermal perception and exercise capacity in the heat. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, Vol. 20, pp. 53–59, 2010.
- [10] 成瀬哲生, 梶井宏宣. 事務所建築における温冷感と熱的要素の季節変動について: 室温と温冷感と着衣量との関係について. 人間-熱環境系シンポジウム報告集, Vol. 1, pp. 51–54, 1977.
- [11] Robert N Singer, Heather A Hausenblas, and Christopher M Janelle. *Handbook of sport psychology*. John Wiley & Sons Inc, 2001.
- [12] ISO7730 ISO. 7730: Ergonomics of the thermal environment—analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the pmv and ppd indices and local thermal comfort criteria. *Management*, Vol. 3, No. 605, p. e615, 2005.
- [13] Tomonori Sakoi, Kazuyo Tsuzuki, Shinsuke Kato, Ryoza Ooka, Doosam Song, and Shengwei Zhu. Thermal comfort, skin temperature distribution, and sensible heat loss distribution in the sitting posture in various asymmetric radiant fields. *Building and environment*, Vol. 42, No. 12, pp. 3984–3999, 2007.
- [14] Michael A Humphreys and J Fergus Nicol. The validity of iso-pmv for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *Energy and buildings*, Vol. 34, No. 6, pp. 667–684, 2002.
- [15] Barbara E Ainsworth, William L Haskell, Stephen D Herrmann, Nathanael Meckes, David R Bassett Jr, Catrine Tudor-Locke, Jennifer L Greer, Jesse Vezina, Melicia C Whitt-Glover, and Arthur S Leon. 2011 compendium of physical activities: a second update of codes and met values. *Medicine & science in sports & exercise*, Vol. 43, No. 8, pp. 1575–1581, 2011.
- [16] JB de V Weir. New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *The Journal of physiology*, Vol. 109, No. 1-2, pp. 1–9, 1949.
- [17] Michaël Huet, Cyril Camachon, Laure Fernandez, David M Jacobs, and Gilles Montagne. Self-controlled concurrent feedback and the education of attention towards perceptual invariants. *Human Movement Science*, Vol. 28, No. 4, pp. 450–467, 2009.
- [18] 小笠原英子, 藺田豊, 水谷孝一, 石川幸雄. 611 温熱画像を用いた生活空間の温熱快適性評価法. バイオエンジニアリング講演会講演論文集 2004.16, pp. 197–198. 一般社団法人 日本機械学会, 2004.

- [19] 三平和雄, 多屋秀人. サーマルマネキンによる着衣の熱抵抗の測定. 空気調和・衛生工学会 論文集, Vol. 3, No. 6, pp. 19–25, 1978.
- [20] ASHRAE Standard. 55, thermal environmental conditions for human occupancy. *American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers*, Vol. 145, , 1992.
- [21] International Organization for Standardization. Iso/fdis 9920: 2007. ergonomics of the thermal environment-estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble, 2007.
- [22] サーマグラフィを用いる着衣下における体表面温度推定. pp. 1E2–03.
- [23] 国立健康, 栄養研究所. 改訂版 「身体活動のメッツ (mets) 表」, 2012.
- [24] 北川薫. 運動とスポーツの生理学. 市村出版, 2001.
- [25] Donald Arnold. Method and apparatus for measuring pulsus paradoxus, March 22 2005. US Patent 6,869,402.
- [26] Kevin Norton and Tim Olds. *Anthropometrica: a textbook of body measurement for sports and health courses*. UNSW press, 1996.
- [27] Stephan P Swinnen, Timothy D Lee, Sabine Verschueren, Deborah J Serrien, and Hedwig Bogaerds. Interlimb coordination: Learning and transfer under different feedback conditions. *Human movement science*, Vol. 16, No. 6, pp. 749–785, 1997.
- [28] Laurie R Wishart, Timothy D Lee, Sheri J Cunningham, and Jason E Murdoch. Age-related differences and the role of augmented visual feedback in learning a bimanual coordination pattern. *Acta psychologica*, Vol. 110, No. 2, pp. 247–263, 2002.
- [29] Charles H Shea and Gabriele Wulf. Enhancing motor learning through external-focus instructions and feedback. *Human Movement Science*, Vol. 18, No. 4, pp. 553–571, 1999.
- [30] Michael Lee, Anne Moseley, and Kathryn Refshauge. Effect of feedback on learning a vertebral joint mobilization skill. *Phys Ther*, Vol. 70, No. 2, pp. 97–102, 1990.
- [31] Suzanne J Snodgrass, Darren A Rivett, Val J Robertson, and Elizabeth Stojanovski. Real-time feedback improves accuracy of manually applied forces during cervical spine mobilisation. *Manual therapy*, Vol. 15, No. 1, pp. 19–25, 2010.
- [32] Fraser Anderson et al. Learning and performance with gesture guides. In *Proc. SIGCHI 2013*, pp. 1109–1118. ACM, 2013.
- [33] Daniel L Eaves, Gavin Breslin, and Paul Van Schaik. The short-term effects of real-time virtual reality feedback on motor learning in dance. *Presence*, Vol. 20, No. 1, pp. 62–77, 2011.
- [34] Felix Hülsmann et al. Multi-level analysis of motor actions as a basis for effective coaching in virtual reality. In *Proc. 10th ISCSS*, pp. 211–214. Springer, 2016.
- [35] Philip Kelly et al. A virtual coaching environment for improving golf swing technique. In *Proc. SMVC 2010*, pp. 51–56. ACM, 2010.
- [36] Fraser Anderson et al. Youmove: enhancing movement training with an augmented reality mirror. In *Proc. UIST 2013*, pp. 311–320. ACM, 2013.
- [37] Yuta Itoh, Jason Orlosky, Kiyoshi Kiyokawa, and Gudrun Klinker. Laplacian vision: Augmenting motion prediction via optical see-through head-mounted displays. In *Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference 2016*, p. 16. ACM, 2016.
- [38] Gabriele Wulf, Charles H Shea, and Sabine Matschiner. Frequent feedback enhances complex motor skill learning. *Journal of motor behavior*, Vol. 30, No. 2, pp. 180–192, 1998.
- [39] Gabriele Wulf and Charles H Shea. Principles derived from the study of simple skills do not generalize to complex skill learning. *Psychonomic bulletin & review*, Vol. 9, No. 2, pp. 185–211, 2002.
- [40] Koji Tsukada and Michiaki Yasumura. Activebelt: Belt-type wearable tactile display for directional navigation. In *International Conference on Ubiquitous Computing*, pp. 384–399. Springer, 2004.

- [41] Martin Pielot, Oliver Krull, and Susanne Boll. Where is my team: supporting situation awareness with tactile displays. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1705–1714. ACM, 2010.
- [42] Ryoichiro Shiraishi, Koya Sato, Yuji Sano, and Mai Otsuki. Haptic directional instruction system for sports. In *Proceedings of Asia Haptics*, 2016.
- [43] Corinna Feeken. Climbingassist: direct vibro-tactile feedback on climbing technique. In *Proc. Ubicomp 2016*, pp. 57–60. ACM, 2016.
- [44] Jacob Rosenthal, Nathan Edwards, Daniel Villanueva, Sreekar Krishna, Troy McDaniel, and Sethuraman Panchanathan. Design, implementation, and case study of a pragmatic vibrotactile belt. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 60, No. 1, pp. 114–125, 2011.
- [45] Daniel Spelmezan. An investigation into the use of tactile instructions in snowboarding. In *Proceedings of the 14th international conference on Human-computer interaction with mobile devices and services*, pp. 417–426. ACM, 2012.
- [46] Jan BF et al. Van Erp. Application of tactile displays in sports: where to, how and when to move. In *Proc. Eurohaptics*, pp. 105–109. Citeseer, 2006.
- [47] Jan BF Van Erp and Hendrik AHC Van Veen. Vibrotactile in-vehicle navigation system. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol. 7, No. 4, pp. 247–256, 2004.
- [48] Jennifer L Burke, Matthew S Prewett, Ashley A Gray, Liuquin Yang, Frederick RB Stilson, Michael D Coovert, Linda R Elliot, and Elizabeth Redden. Comparing the effects of visual-auditory and visual-tactile feedback on user performance: a meta-analysis. In *Proceedings of the 8th international conference on Multimodal interfaces*, pp. 108–117. ACM, 2006.
- [49] Ian Oakley, Marilyn Rose McGee, Stephen Brewster, and Philip Gray. Putting the feel in ‘look and feel’. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 415–422. ACM, 2000.
- [50] Akio Nakamura, Sou Tabata, Tomoya Ueda, Shinichiro Kiyofuji, and Yoshinori Kuno. Multimodal presentation method for a dance training system. In *CHI’05 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 1685–1688. ACM, 2005.
- [51] Emanuele Ruffaldi, Alessandro Filippeschi, Antonio Frisoli, Oscar Sandoval, Carlo Alberto Avizzano, and Massimo Bergamasco. Vibrotactile perception assessment for a rowing training system. In *World Haptics 2009-Third Joint EuroHaptics conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 350–355. IEEE, 2009.
- [52] Yuji Sano, Koya Sato, Ryoichiro Shiraishi, and Mai Otsuki. Sports support system: Augmented ball game for filling gap between player skill levels. In *Proceedings of the 2016 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, pp. 361–366. ACM, 2016.
- [53] 高鳥光, 圓崎祐貴, 矢野博明, 岩田洋夫. 大規模没入ディスプレイ largespace の開発. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 3, pp. 493–502, 2016.
- [54] Jack M Loomis and Carter C Collins. Sensitivity to shifts of a point stimulus: An instance of tactile hyperacuity. *Perception & Psychophysics*, Vol. 24, No. 6, pp. 487–492, 1978.
- [55] Yasuhiro Seya and Katsumi Watanabe. Objective and subjective sizes of the effective visual field during game playing measured by the gaze-contingent window method. *International Journal of Affective Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 11–19, 2013.
- [56] Sandra G Hart and Lowell E Staveland. Development of nasa-tlx (task load index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in psychology*, Vol. 52, pp. 139–183, 1988.
- [57] 芳賀繁, 水上直樹. 日本語版 nasa-tlx によるメンタルワークロード測定各種室内実験課題の困難度に対するワークロード得点の感度. 人間工学, Vol. 32, No. 2, pp. 71–79, 1996.

著者文献

査読付き雑誌論文

(J-1) 佐野祐土, 佐藤晃矢, 白石僚一郎, 大槻麻衣: “球技における視触覚刺激提示がプレイスキルに及ぼす影響” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 22-4, 493-502, 2017. https://doi.org/10.18974/tvrsj.22.4_493

査読付き国際会議論文

(I-1) Yuji Sano, Koichi Mizutani, Keiichi Zempo, Naoto Wakatsuki: “Lung Volume Estimation for Thoracic Respiration Via Chest Size Deviation Measurement,” Proceedings of The 5th IEEE Global Conference on Consumer Electronics, p. 529-533. (Melparque Kyoto, 2016.10)

<https://doi.org/10.1109/GCCE.2016.7800500>

(I-2) Yuji Sano, Koya Sato, Ryoichiro Shiraishi, Mai Otsuki: “Player Perception Augmentation for Beginners Using Visual and Haptic Feedback in Ball Game” Proceedings of IEEE VR 2019, pp. 1142-1143. (Osaka, 2019.3)

<https://doi.org/10.1109/VR.2019.8798372>

(I-3) Yuji Sano, Koya Sato, Ryoichiro Shiraishi, Mai Otsuki, Koichi Mizutani: “Visuo-Haptic Interface to Augment Player’s Perception in Multiplayer Ball Game” Proceedings of ICAT-EGVE 2019, pp. 53-56. (Tokyo, 2019.9)

<https://doi.org/10.2312/egve.20191280>

その他の査読付き国際会議論文

(O-1) Yuji Sano, Koya Sato, Ryoichiro Shiraishi, Mai Otsuki: “Sports Support System: Augmented Ball Game for Filling Gap between Player Skill Levels,” Proceedings of the 2016 ACM on Interactive Surfaces and Spaces, p. 361-366. (Crowne Plaza Hotel Niagara Falls-view, 2016.11)

<https://doi.org/10.1145/2992154.2996781>

(O-2) Ryoichiro Shiraishi, Koya Sato, Yuji Sano, Mai Otsuki: “Haptic Directional Instruction System for Sports” Proceedings of Asia Haptics, Kashiwanoha, 62E-1. (Kashiwanoha, 2016.11)

https://doi.org/10.1007/978-981-10-4157-0_61

査読のない国内講演会等における発表論文

(D-1) 佐野祐土, 水谷孝一, 善甫啓一, 若槻尚斗, 小笠原英子: ”人体表面の放射温度分布を特徴量とするコサイン類似度を用いる着衣量推定,” 生活生命支援医療福祉工学系連合大会 2014, GS9-1. (ルスツリゾートホテル, 2014.9)

<http://www.jslst.org/documents/Conference/2014/html/pdf/GS9-1.pdf>

(D-2) Yuji Sano, Koichi Mizutani: Extraction of Feature for Estimation of Clothing Insulation Using Thermography,” The 11th IEEE Transdisciplinary-Oriented Workshop for Emerging Researchers Programs & Abstracts, 13, p.24. (東京都市大学, 2014.11)

<https://www.young-researchers.net/pdf/abstracts11th.pdf>

(D-3) 佐野祐土, 水谷孝一, 若槻尚斗: ”放射温度分布を用いる類似度に基づく着衣量推定,” SAT テクノロジー・ショーケース 2015, プログラム & アブストラクト集, P-62, p.64. (つくばエポカル, 2015.1)

http://www.science-academy.jp/showcase/14/pdf/P-062_showcase2015.pdf

(D-4) 佐野祐土, 水谷孝一, 善甫啓一, 若槻尚斗: ”人体表面の放射温度分布の特徴量抽出による着衣量推定に関する研究,” 日本機械学会関東支部第 54 回学生員卒業研究発表講演会. (横浜国立大学 2015.3)

https://www.jsme.or.jp/kt/sotsuken/54thGakusei_program20150303.pdf

(D-5) 佐野祐土, 水谷孝一, 善甫啓一, 若槻尚斗, 小笠原英子: ”サーモグラフィを用いる着衣下における体表面温度推定,” 生活生命支援医療福祉工学系連合大会 2015, 1E2-03. (九州産業大学, 2015.9)

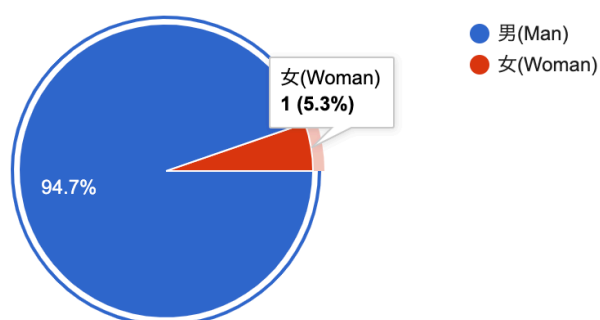
<http://www.jslst.org/documents/Conference/2015/data/thesis/1e2-03.pdf>

付録：視野外位置情報提示実験における実験アンケート

性別

性別 (Gender)

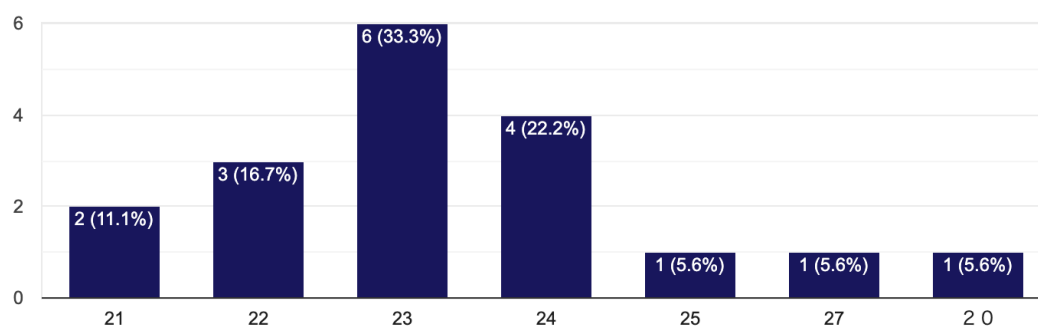
19 件の回答



年齢

年齢 (Age)

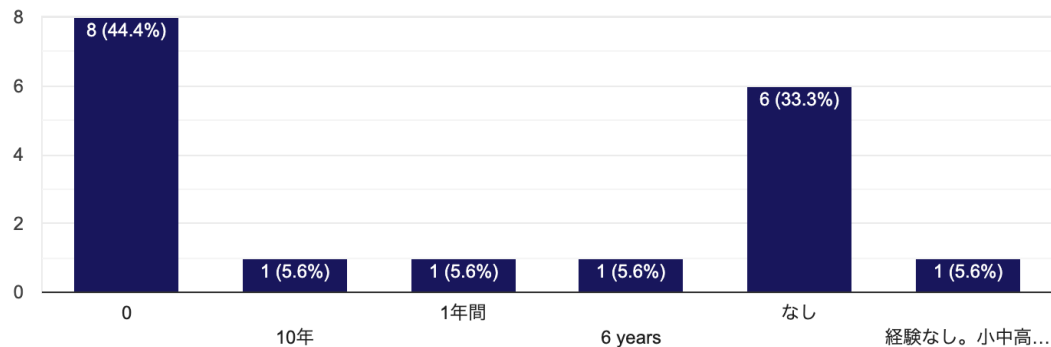
18 件の回答



サッカー経験の有無

サッカー経験者は経験期間を記入してください

18 件の回答



[条件 (i) : システムなし]でパスカットをする時、プレイの中で何を意識しましたか（複数回答可）

相手の目線、足元の動き

ボール

パスを出す人の足の向き (どっちに蹴るか) と、目線 (パスを受ける人を見ていると思う) に注目した

蹴る人の足の動き、前回の蹴った位置

背後の人の音、何処にいたかの記憶

相手の視線

相手の軸足の向き

相手の脚の方向

Bさんの位置

出し手の目

受ける人の足音、パスを出す人の目線

フェイントの掛け方、後ろのプレイヤーの動く音

パスを出す人の目線や体の動き

相手の目線

視線、足音

足の向き、受け手の位置

打つ人の視線

受け手の動き

[条件(ii)：視覚あり]でパスカットをする時、プレイの中で何を意識しましたか（複数回答可）

相手の軸足の向き、光線、
出し手の目と受け手の位置
直線の方
後ろの相手の位置
パスを受ける人の目線を遮るために赤い線の上にいるように意識した
後ろのプレイヤーの位置、フェイントの掛け方
視覚情報、相手の視線
パサーの動きと、視覚補助
Aさんのける方向
パスを受ける人の動き
背後にいる人の位置から、カット可能な範囲を考慮した立ち回り
線、足の向き
相手のパスできる幅
線の動きの予想
線、パスを受ける人
赤い線、パスを受け取る人の行動範囲
足元のラインの方向

[条件(iii)：振動あり]でパスカットをする時、プレイの中で何を意識しましたか（複数回答可）

相手の軸足の向き
振動、音
相手の目
振動方向から角度を絞った
後ろの相手の位置
パスをする人たちに気づかれないように、振動で後ろの受け手の位置を把握して、蹴る一瞬前にボールを追いかけることを意識した。
後ろのプレイヤーの位置
振動のみ
振動、パサーの動き
後ろを見ないで、相手にBさんの位置が分かっていることを悟られないこと
パスを受ける人の動き

振動、相手のフェイント
足の向き、振動
相手のパスできる幅
振動で受ける人の場所を意識した
パスを受ける人、ベルト
振動、パスを受ける人の行動範囲
振動方向

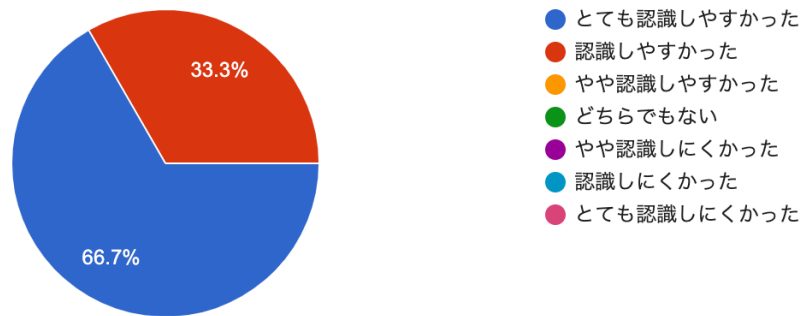
[条件(iv)：視覚振動あり]でパスカットをする時、プレイの中で何を意識しましたか（複数回答可）

相手の軸足の向き、光線
出し手の目と受け手の位置
振動方向から角度を絞った 足音
視覚の情報
視覚ありと同様に目線を遮るために赤い線の上に立つことを意識した。
後ろのプレイヤーの位置 (主に視覚)
視覚と振動
視覚が優位で振動が気づかなかった
Aさんのける方向
パスを受ける人の動きとパスを出す人の動き
振動、視覚マーカー
線、振動、足の向き
パスできる幅、誘導
線の動きの予想
線(強い)、ベルト(弱い)、パスを出す人
振動、線を意識しすぎないこと、パスを受ける人の行動範囲
足元のライン

視覚刺激提示による視野外相手プレイヤー位置の認識のしやすさ

システムから視覚的に提示された相手プレイヤーの位置は認識しやすかったですか？ (Is it easy to recognize the position of players visually provided by the system?)

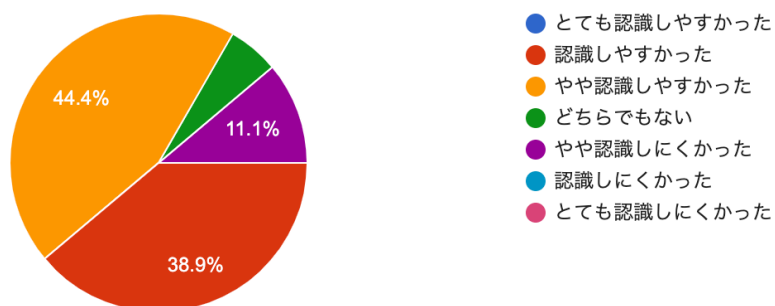
18 件の回答



触覚刺激提示による視野外相手プレイヤー位置の認識のしやすさ

システムから触覚的に提示された相手プレイヤーの位置は認識しやすかったですか？

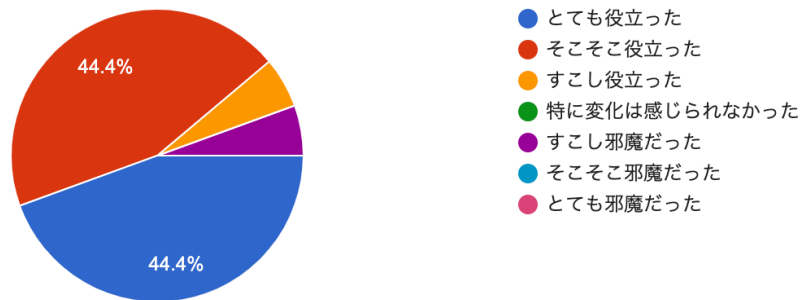
18 件の回答



視覚刺激提示によるパスカットパフォーマンスへの寄与

視覚刺激提示はパスカットに役立ちましたか？

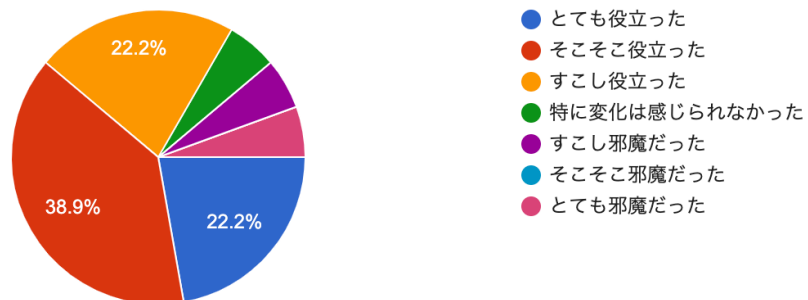
18 件の回答



触覚刺激提示によるパスカットパフォーマンスへの寄与

触覚刺激提示はパスカットに役立ちましたか？

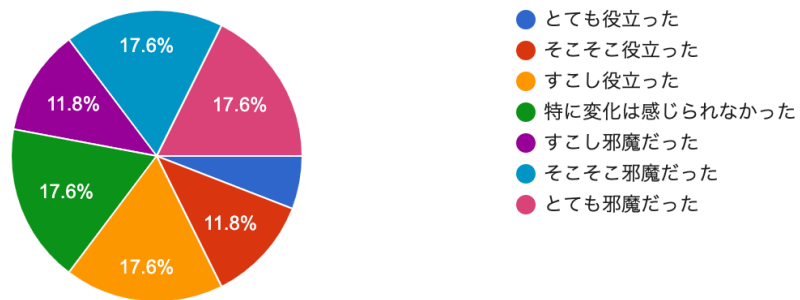
18 件の回答



パスを出すロールへの視覚刺激提示による影響

視覚刺激提示はパスを出すことに役立ちましたか？

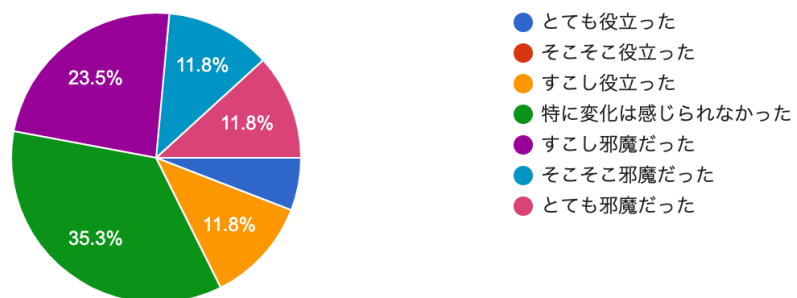
17 件の回答



パスを受け取るロールへの視覚刺激提示による影響

視覚刺激提示はパスを受けることに役立ちましたか？

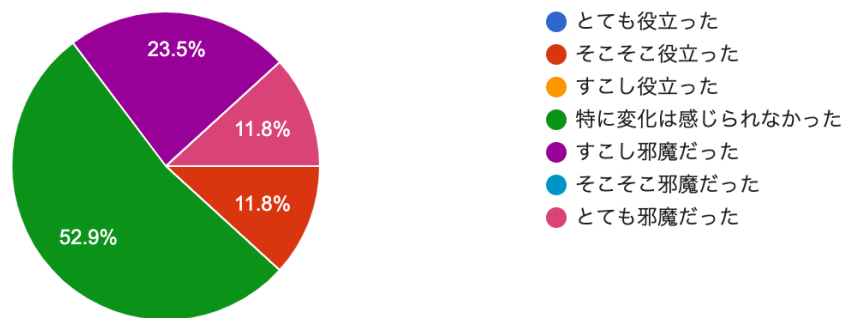
17 件の回答



パスを受け取るロールへの触覚刺激提示による影響

触覚刺激提示はパスを受けることに役立ちましたか？

17 件の回答



触視覚刺激提示システムを用いてスポーツをするとした場合、他にどのようなスポーツをしてみたいですか？（複数回答可）

テニスダブルス

ゴルフ、アイスホッケー、ボクシング

かくれんぼ

バスケ

ドッチボール

バドミントン、テニス

ドッジボールでボールの位置が提示されると面白いかも。死角に人がいる、ボールがあるなど、見えない場所の状況を予測するゲームでは、刺激の有無で戦略が変わりそうだと思います。

一方、テニスのような対面式のゲームだと位置提示は意味がなさそうですが、視覚刺激として弾道の予測軌道が提示されると面白いかもしれません。(できるのかはわかりませんが)

サッカー、バレーボール

その他, 本日の実験に対してご意見等があればご自由にお書きください.

パスカット役の位置と光の道筋の距離からパス成功確率が逐次表示されると数値がリアルタイムで見れて面白いと思います☑

もっと若い力を雇用すべき

視覚情報が逆にパス側のフェイントに使えと感じました

とても楽しかったのでまたやって見たいです

触覚刺激よりも視覚刺激の方が影響が大きい気がした。実験自体は大変楽しかったです。

触覚刺激(振動)はパスをする人たちに気づかれずに位置を知ることができるのでカットするのに役立った。視覚刺激(赤い線)はパスを出すとき、受けるときはカットする人に位置がバレるのでやりにくかった。また、ジェスチャーをしてもよいのであれば、視覚と触覚の刺激があっても、もっとパスを出したり受けたりしやすいと思いました。

なかなかいい運動になりました。

球数が多かった。視線に先入観を持ってしまい、難しかった。振動は個人的に使いやすかった。サッカーの技術力も、依存していると思った。

楽しかった。新しい指示システムだと思った

帽子の締め付けが強かった。

壁に観客の絵を表示してあればもっと盛り上がると思う

球出しを統一したものにして良いかと。

光が難しいです

楽しかったのでまたやりたいです

コート内が少し蒸し暑く、スポーツをするには厳しい環境だと感じた。

疲れました。

疲れました