

サッカーにおける視覚探索運動の変化を引き起こす視野狭窄提示

大浦那佑太[†] 亀田 能成^{††}

[†] 筑波大学 理工情報生命学術院システム情報工学研究群 知能機能システム学位プログラム

〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1-3L308

^{††} 筑波大学 計算科学研究センター 〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

E-mail: [†]oura.nayuta@image.iit.tsukuba.ac.jp ^{††}kameda@ccs.tsukuba.ac.jp

あらまし サッカーにおける視覚探索運動の制限要因として視野狭窄が挙げられる。本研究では、サッカーの VR シミュレーションにおいて疑似的に視野狭窄を提示する手法を提案する。この疑似視野狭窄提示は、周辺視野領域にぼかしをかけることにより実現される。評価実験では、疑似視野狭窄適用の有無による比較を行い、視覚探索行動の頻度を示す首振り回数と、質を示す首振り範囲を計測した。結果、実験対象者は疑似視野狭窄提示に対し、首振り回数を増加させ情報を補う傾向が確認された。一方、首振り範囲は個人差がある結果となった。これは、各実験対象者のスキルや心理的余裕の違いにより、視野狭窄発生時の適応戦略が異なることを示唆している。

キーワード VR, 視線追跡, 視野狭窄, 視覚探索運動

1. はじめに

サッカーにおいて、選手が相手選手、味方選手、ボールの位置などの周囲の状況を迅速かつ正確に把握する視覚探索運動は、試合中の選手の認知および判断のプロセスにおいて重要な役割を果たす [1][2][3]。サッカーにおける視覚探索運動の制限要因として視野狭窄が挙げられる。視野狭窄は心理的な要因等により有効視野が狭くなることで生じる効果として知られている [4][5][6]。こうした視野狭窄がサッカーにおいても発生しうるのであるのか、発生した場合に選手の視覚探索運動にどのような影響を与えるのかについては調査が待たれている。この調査においては、与えられた命令と視覚刺激とそれに対する行動を正確に計測することが求められる。

これまでに VR シミュレーションを用いて視覚探索運動の調査が行われてきた [7][8]。視覚探索運動と視野狭窄の関係を調査する上では、視覚探索運動と視野狭窄の関係を調査する上では、選手が状況を認識するよう意識している状況下での詳細な計測が求められる。このとき、視野狭窄として与える視覚刺激には正確な再現性と厳しい統制が必要となる。

本研究では、この実現のため、VR シミュレーションにおける視野狭窄の発生有無とその再現手法について検討を行い、疑似的に視野狭窄を実現する手法を提案する。この疑似視野狭窄提示は、周辺視野領域にぼかしをかけることによって実現される。サッカーにおいて視野狭窄が選手の視覚探索運動に与える影響を明らかにする検証として、疑似視野狭窄提示を適用する条件と適用しない条件の双方でタスクを実施し、選手の視覚探索運動の頻度および質を表す左右の首振りの回数とその範囲を計測し比較する。これらの比較分析を通じて、サッカーにおける視野狭窄と視覚探索運動の関係を明らかにする。

2. 関連研究

2.1 サッカーにおける視覚探索運動

スポーツにおいて、認知、判断のスキルは試合中のパフォーマンスを決定づける重要な要素であることが報告されている [1][2][3]。サッカーにおける視覚探索運動の計測に関して、夏原ら [9] はパス遂行時の視線解析を行っている。その結果、有効なパフォーマンスを発揮するためには、より多くの対象へ視線を向ける広範囲な視覚探索運動が重要であることが明らかになっている。

また、Vaeyens et al. [10] は戦術的判断の質と視覚探索運動の関連について調査を行っている。彼らの研究では、的確な判断を行うためには視線を動かすことで注視対象を頻繁に切り替える行動が不可欠であることが示されている。

2.2 スポーツにおける視野の変化

スポーツにおける運動後および運動中の視野の狭窄、拡大についての調査が進められている。Krestovnikov [4] は、ボールゲームを行った後の視野についての計測を行った。計測の結果、運動後には一時的な視野の狭窄、周辺視野の鈍化が起こることが報告された。

また、石垣ら [5] は運動前、運動中、運動後における視野の変化の調査を行った。調査の結果、運動中には一時的な視野の狭窄が起こり、その程度は運動の強度や心拍数に基づいていることが報告された。こうした現象の背景には、生理的および心理的なメカニズムが関与していると考えられている。

Easterbrook の手がかり利用仮説 [6] によれば、心拍数やストレスなどが上昇すると、注意の範囲が狭まり、中心部の重要な情報に処理リソースが集中する一方で、周辺情報の処理が抑制される知覚的狭窄が生じると説明されている。本研究では、これらの知見をもとに、疑似視野狭窄提示の程度と選手の走行速度を関連付けた実装を行う。

2.3 視野狭窄と視覚探索運動

人間の視覚探索運動は、身体的な運動強度だけでなく、認知負荷や心理的負荷によっても変容する。特に、認知負荷の増大が有効視野の狭窄を引き起こし、それに伴って視覚探索運動が変化することは、交通心理学や人間工学の分野で広く報告されている。Recarteらは[11]、自動車運転中のドライバーに対して暗算などの課題を課した際の視線挙動を計測した。その結果、認知負荷が高い状況下では、視線の空間的凝集が発生することを明らかにしている。

同様の現象はスポーツにおける高圧的な状況下でも確認されている。Williamsらは[12]、空手選手を対象に不安条件が視覚探索運動に与える影響を調査した。その結果、不安レベルが高い状態では、注視点が攻撃部位などの特定の情報源に固定化される傾向があることが報告された。

Wilsonら[13]はサッカーのペナルティキックを対象に、不安が視線やパフォーマンスにどのような影響を与えるかを調査している。その結果、不安条件下では、選手は脅威となる相手選手を長く注視し、それがパフォーマンスの低下を招くことを明らかにしている。

これらの研究から、心理的負荷等によって視野狭窄が発生している状況下では、視線移動の低下が起これ、視覚探索運動に影響を与えることが分かる。本研究において視野狭窄条件下での視覚探索運動を定量化することは、高負荷時における選手のパフォーマンス低下の要因を認知・行動レベルで解明する上で重要な意味を持つ。

2.4 VRによるスポーツのシミュレーション

試合状況を再現し、HMDを通じてユーザーに提供することを可能にするVRを用いたスキルトレーニングが開発されており、その体験を通して選手のパフォーマンスが向上することが明らかにされている[14]。具体的な事例として、Cesarら[8]はサッカーにおいて、視覚探索運動の測定およびパスを遂行する際の反応時間を短縮するためのトレーニングとして、VRを用いたシステムを提案した。彼らの評価実験では、HMDから取得された選手の頭部方向を三つのエリアに分類し、選手が各方向を向いていた時間の割合から視覚探索運動の評価が行われた。しかし、この手法は頭部の向きを離散的なエリアとして扱っており、運動の詳細な特性までは捉えていない。対して本研究では、HMDの頭部回転角度を連続値として取得し、そのデータから探索運動の範囲を算出するとともに、波形データのピーク検出を行うことで首振りの回数を定量化する手法をとる。これにより、単なる向きの割合だけでなく、探索運動の強度や頻度といった動的な特性を含めた、より詳細な分析が可能となる。

石川ら[15]はバスケットボール選手の視覚トレーニングを行うためのVRシミュレーションに、計測された選手の位置情報を活用している。本研究でもこの手法を参考に、サッカーの試合中に計測された選手の位置情報を活用してVRシミュレーションの選手の動きに戦術性を持たせている。

3. 視野狭窄の疑似再現手法の検討

VRシミュレーションにおいて視野狭窄を再現するための手

法について、検討を行う。周辺視野からの視覚情報を制限する手法としては画面の拡大、周辺視野領域の暗転、周辺視野領域にぼかしを適用することが考えられる。先行研究では、視野狭窄が発生している際には周辺視野の鈍化や注視点の固定化が起こることが明らかにされているため[4][12]、再現手法にはその特性を再現することが求められる。

単純に画面全体を拡大することによって視野角を見かけ上狭める手法は、視野内に見えているものの大きさを見かけ上変えてしまうため、本研究目的には不適切である。

周辺視野領域を暗転させる手法についても同様に、選手が取得できる情報の一部を削除する手法であることから、認知的な感度の低下を表すモデルとしては不適切であると判断する。

本研究では周辺視野領域にぼかしを適用する手法を採用する。ぼかし処理は、画像の視覚的な解像度を減衰させる一方で、色や動きといった情報は保持する性質を持つ。したがって、高負荷時において脳が周辺視野の精細な情報処理を抑制し、対象の大まかな概略のみを知覚している状態の再現として妥当性が高いと判断する。本研究で想定する視野狭窄は、選手に与えられる負荷によって動的に変化するものであるため、疑似視野狭窄提示のためのぼかしの適用を実現する上で、既存の中心窩レンダリング[16]のような固定された範囲の大きさでぼかしを適用する方法は不適切である。本研究では、注視座標と移動速度に応じぼかしを適用する範囲を動的に変更することで疑似視野狭窄提示を実現するものとする。

4. VRシミュレーションにおける疑似視野狭窄提示手法

4.1 視野狭窄の発生が想定される状況

本研究においてVRシミュレーションで疑似視野狭窄提示を行う状況としては、試合中に得点を狙うべく、相手ペナルティエリア内に侵入していく局面を選定した。この状況を選定した理由は主に二点ある。第一に、視覚探索運動の重要性である。このような局面では一瞬の判断が求められるため、常に周囲の状況を意識し、的確に把握する視覚探索運動が不可欠となる。第二に、視野狭窄の発生メカニズムとの整合性である。ゴール前では相手選手からのプレッシャーが強まることが予想され、それに伴い認知負荷や心理的負荷が増大する。こうした高負荷な状態は視野狭窄を誘発する要因と考えられており、本手法の検証に適した状況であると判断した。

4.2 注視に応じた解像度制御

図1のように注視座標によって動的にぼかし領域を変化させる実装を行う。

まず始めに、フレームごとに注視座標と各ピクセルの距離を計算し、ピクセルがあらかじめ設定された有効視野領域の範囲内にあるかの判定を行う。ピクセルが有効視野領域の範囲外にある場合、ぼかし半径に基づいて水平方向の近傍ピクセルに対して色のサンプリングを行い、ガウシアンブラー[17]のアルゴリズムを参考にした重みを用いて加重平均をとった色の出力を行う。ピクセルが有効視野領域の範囲内にある場合、解像度制御を行うことなくそのままの色を出力する。これらの操作を各

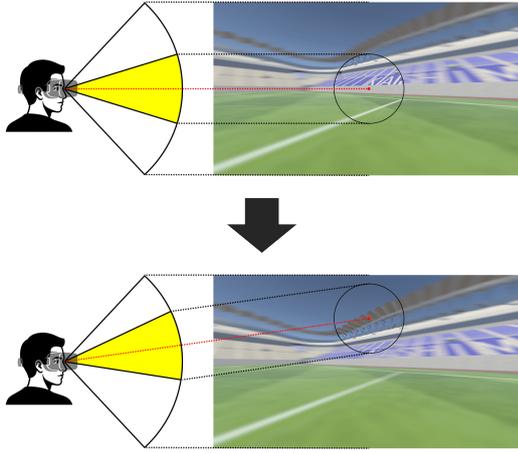


図1 注視に応じた解像度制御

フレームの全ピクセルに対してリアルタイムで適用する。

4.3 速度に応じた解像度制御

本研究の疑似視野狭窄提示はVR空間内を移動するユーザーの速度に応じて図2のようにぼかし強度と有効視野領域を変化させるものとする。走行速度の上昇に伴って周辺視野に適用するぼかし強度を大きくし、同時に鮮明に描画される有効視野領域を段階的に狭めていく制御を行う。この際、静止時における初期の有効視野領域の大きさや、速度の増加に応じた視野の減少率などのパラメータ設定については、実際のスポーツ選手を対象に運動強度と視野の関係を調査した石垣らの研究[5]の知見を参照する。

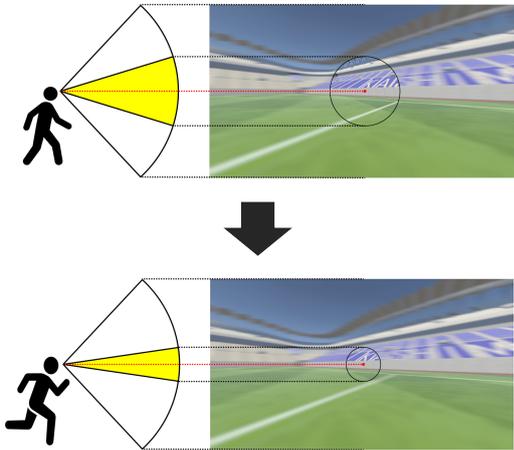


図2 速度に応じた解像度制御

4.4 ぼかしの適用

まず、視線追跡により取得した注視座標を、スクリーン空間上のUV座標系に正規化し、シェーダーへと渡す。シェーダー内部では、サンプリングされた処理対象のピクセル座標 (u, v) と正規化された注視座標 (u_c, v_c) のユークリッド距離 $d(u, v)$ を計算する。ここで、画面の歪みを防ぐためにアスペクト比 A を用いて補正を行う。

$$d(u, v) = \sqrt{\{A \cdot (u - u_c)\}^2 + (v - v_c)^2} \quad (1)$$

この距離 $d(u, v)$ と、有効視野領域の範囲として設定したパ

ラメータであるしきい値 R との比較を行い、最終的な出力色 $O(u, v)$ を決定する。 $d(u, v) < R$ の場合、処理対象のピクセルが有効視野領域内にあると判定し、入力テクスチャの座標 (u, v) における色 $T(u, v)$ をそのまま出力する。それ以外の場合、視野狭窄領域としてぼかし処理を適用する。ここで、 B_{horiz} は後述する水平方向のぼかしである。

$$O(u, v) = \begin{cases} T(u, v) & \text{if } d(u, v) < R \\ B_{horiz}(u, v, S) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

ぼかし強度として設定したパラメータ S の範囲内で周辺ピクセルの色のサンプリングを行い、各サンプル点における重み $w(k)$ を以下のように定義する。

$$w(k) = \exp\left(-\left(\frac{k}{S}\right)^2\right) \quad (3)$$

B_{horiz} は、入力テクスチャの座標 (u, v) における色 $T(u, v)$ とテクスチャの水平方向のテクセルサイズ δ_x を用いて以下のように定義される。

$$B_{horiz} = \frac{\sum_{k \in K} T(u + k \cdot \delta_x, v) \cdot w(k)}{\sum_{k \in K} w(k)} \quad (4)$$

ここで $K = \{-S, -S + 0.5, \dots, S\}$ である。以上の操作により、図3に示すようなぼかしを適用する。



図3 ぼかしの様子

5. 評価方法

5.1 定量評価

疑似視野狭窄提示がユーザーの視覚探索運動に与える影響を検証するため、頭部の回転頻度および一回あたりの回転量の二点を定量評価の指標とする。具体的な計測手法としては、測定中のHMDの回転データから、水平方向の回転角度(Yaw)を時系列で記録する。この取得された角度データに対してピーク検出処理を適用することで、意図的な首振り動作を抽出する。

まず、抽出されたピークの総数から、ユーザーが周囲の状況を確認するために行った首振りの頻度を算出する。これは、視野狭窄によって視覚的な情報量が減少した際、その不足を補うために視覚探索運動の回数が増加するかを検証するためである。次に、抽出された各首振りの振幅を算出することで首振り一回あたりにどの程度の範囲を確認したかを評価する。これにより、ユーザーが行う視覚探索運動の特性を分析する。

5.2 主観評価アンケート

定量的なデータに加え、ユーザーの内面的な変化や感覚を捉えるためにアンケートによる主観評価を実施する。回答形式には、1（全くそう思わない）から7（非常にそう思う）までの七段階リッカート尺度を用いる。設問は、視野制限下における視覚探索運動に対する意識の変容と、自身の視覚探索運動の質や状況把握に対する自己評価に焦点を当てて設定する。これにより、定量データだけでは測れない、ユーザーの心理的な負担や探索戦略の変化を検証する。

6. 評価実験

6.1 VRシミュレーションにおける首振り回数の変化の傾向

前提として、VRシミュレーションにおける首振り回数の変化の傾向の調査を行う。実験対象者は正常な視力を有した20代の男性3名を対象とした。同じシナリオのVRシミュレーションを2回連続して体験し、その際の視覚探索運動の変化を調べた。

結果を表1にまとめる。結果から、首振りの回数、範囲共に一回目と二回目で有意差なしという結果になった。同じシナリオでVRシミュレーションを2回連続して体験した場合、視覚探索運動に変化は生じないことが分かる。以降は、疑似視野狭窄の提示によって視覚探索運動に変化が生じた場合、疑似視野狭窄提示が実験対象者の視覚探索運動を変化させたとみなすこととする。

表1 VRシミュレーションにおける首振り回数の変化の傾向

指標	1回目	2回目	変化量	p値	判定
首振り回数(回)	15.3	15.7	+0.3	0.750	n.s.
首振りの範囲(deg)	45.7	81.8	+36.0	0.250	n.s.

(Wilcoxon signed-rank test)

6.2 実験手順

サッカーにおける視野狭窄と視覚探索運動の関係を明らかにするために実験を行う。実験対象者は正常な視力を有した20代の男女11名を対象とした。提案手法の疑似視野狭窄提示の有無を変数とし、疑似視野狭窄提示を行わない条件を統制条件、再現を行う条件を介入条件とする。実験設計には被験者内計画を採用し、各実験対象者が統制条件と介入条件の両方を行うことで、個人の能力差や視覚探索運動に対する意識の影響を最小限に抑えている。また、順序効果の排除のため、カウンターバランス法を実施している。

評価指標は以下の二つに分類可能である。第一に客観的指標として視覚探索運動の頻度を表す左右の首振りの回数と、視覚探索運動の質を表す首振りの範囲を用いる。第二に主観評価アンケートを基にした実験対象者の視覚探索運動への意識と、自身の視覚探索運動の自己評価に対するスコアを用いる。アンケートの設問は表2の通りである。

実験の流れは、まずどちらか一方の条件でサッカーのVRシミュレーションを体験した後主観評価アンケートに回答し、もう一方の条件で同じことを繰り返す、というものである。

表2 アンケート項目(7段階リッカート尺度)

ID	質問項目
意識	
Q1	シミュレーション中、周囲の確認を意識したか
Q2	シミュレーション中、視野の外にも情報があることを自覚したか
Q3	シミュレーション中、視覚探索運動が状況把握に重要だと感じたか
自己評価	
Q4	シミュレーション中、周囲の状況をうまく把握できた
Q5	シミュレーション中、自身の視覚探索運動は不十分であった

6.3 提案手法による視覚探索運動の変化の検証

統制条件と介入条件との間の各実験対象者の視覚探索運動の変化について検証する。各実験対象者の首振りの回数と範囲の変化を図4に、11名の実験対象者の結果の平均をとったものを表3に表す。

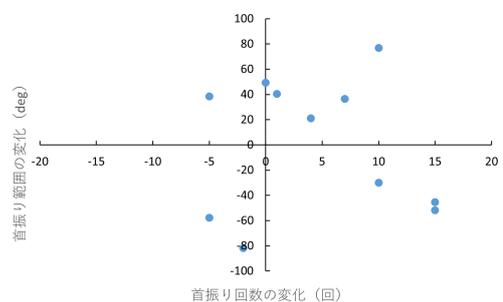


図4 疑似視野狭窄提示による視覚探索運動の変化

表3 疑似視野狭窄疑似提示による視覚探索運動の変化

指標	統制条件	介入条件	変化量	p値	判定
首振り回数(回)	20.6	25.2	+4.6	0.092	*
首振りの範囲(deg)	72.0	71.6	-0.4	0.831	n.s.

(Wilcoxon signed-rank test, * $p < 0.10$)

実験の結果、首振りの回数については、図4から11名中7名と、64%の実験対象者で増加を示したことが分かる。表3から実験対象者の首振りの平均回数は平均の変化量は4.55回と増加したことが分かる。ウィルコクソンの符号付順位検定では $p = 0.09$ と10%水準で有意であるため増加傾向にあるといえる。首振りの幅については、図4から増加が6名、減少が5名という結果になったことが分かる。実験対象者の首振りの平均範囲を分析すると、表3から平均の変化量は-0.4°と差が出ない結果になった。ウィルコクソンの符号付順位検定では $p = 0.83$ と有意差なしであると分かる。

結果から、実験対象者が視野狭窄という制限に対して首振りの回数で情報を補おうとする傾向にあることが分かった。これは、視野狭窄によって周辺視野領域の情報が減少したことによって実験対象者に周囲の情報の見落としへの意識を喚起させた結果だと考えられる。一方で、首振りの範囲に関しては実験対象者全体としての有意差は見られなかった。しかし、個人の変化に着目すると、範囲が増加した群と減少した群に分かれており、個人差があることが分かった。これは、視覚探索運動の

質は情報の見落としに対する危機感だけでは自動的に向上せず、各実験対象者のスキルや心理的負荷に対する余裕の違いから視野狭窄が発生した際の適応戦略が異なることを示唆していると考えられる。

6.4 主観評価アンケート

主観評価アンケートの結果を表4に示す。結果から、視覚探索運動の意識の変化を問う設問では、三項目すべてで介入条件においてスコアが上昇したことが読み取れる。中でも周囲の情報の見落としに対する自覚を問う項目では、ウィルコクソンの符号順位検定によって $p < 0.01$ と極めて強い有意差が出ており、提案手法の疑似視野狭窄提示が情報の見落としに対する危機感を与える点において優れていることが考えられる。自身の視覚探索運動の質や状況把握に対する自己評価を問う設問では、実験対象者自身の状況把握に対する手ごたえを問う Q4 において、介入条件でスコアが低下し、反対に自身の視覚探索運動に対する不足感を問う Q5 において介入条件でスコアが上昇した。ここから、視野狭窄が発生している状況下では、周囲の状況を把握できたという自信を与えづらくなると考えられる。そのため、提案手法の疑似視野狭窄提示が、自身の視覚探索運動に対して慎重な評価を促したといえる。ウィルコクソンの符号順位検定では、Q4 では $p < 0.05$ と有意差となったが Q5 では $p = 0.23$ と有意差はなかった。提案手法の疑似視野狭窄提示では自身の視覚探索運動に対する反省を促す効果は充分ではないといえるため、さらなる視覚探索運動の改善には客観的なフィードバックが必要となることが考えられる。

表4 主観評価アンケート

質問項目	統制条件	介入条件	変化量	p 値	判定
Q1	4.91	6.27	+1.36	0.017	*
Q2	4.09	6.55	+2.45	0.003	**
Q3	4.91	6.55	+1.64	0.011	*
Q4	5.18	4.55	-0.64	0.038	*
Q5	3.09	3.82	+0.73	0.230	n.s.

(Wilcoxon signed-rank test, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$)

6.5 視野狭窄に対する適応戦略

提案手法による視覚探索運動の変化の検証から、疑似視野狭窄提示による首振りの回数については増加傾向にあるものの有意差なし、首振りの幅については二極化する結果が得られた。ここから、視野狭窄に対する適応戦略は各実験対象者で異なることが示唆されたため、視覚探索運動の変化から各実験対象者の適応戦略の分析を行う。

提案手法による首振りの回数と、その範囲の変化をまとめた図を図5に示す。図5を見ると、実験対象者は首振りの回数、範囲ともに増加させた群と、回数のみ増加し範囲が減少した群、範囲のみ増加し回数が減少した群、回数、範囲ともに減少した群に分けられることが分かる。ここでは、それぞれの群を順に適応群、形骸群、慎重群、抑制群とする。

6.6 議論

前述の分類に基づき、各群の適応戦略とその背景にある要因について考察する。まず適応群は、視野狭窄に対する理想的な

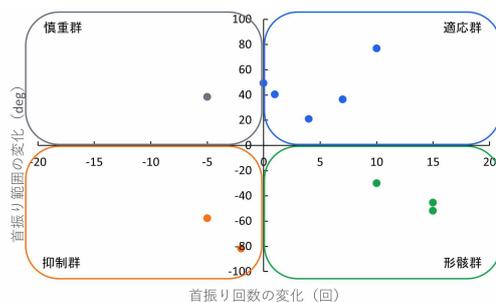


図5 視野狭窄に対する適応戦略

適応であり、周囲の情報の見落としに対して首振りの回数を増やし、かつ深く首を振ることで死角を補ったと考えられる。形骸群については、周囲の情報の見落としに対する危機感から首振りの回数を増加させたが、焦りによってその範囲が浅くなり、結果的に十分な視野を確保することができていないと考えられる。慎重群については、周囲の情報の見落としを自覚したことにより視覚探索運動の質を重視し、一回一回の首振りに集中しながらその範囲を増加させたと考えられる。抑制群については、認知負荷の増大に適応することができず視覚探索運動そのものが減少してしまったと考えられる。

形骸群は首振りの回数は増加しているため、外見や本人の自覚の上では精力的に視覚探索運動を実施しているように見える。しかし、実際には視覚探索運動の質は低下しているため、周囲の情報に十分に気を配ることができていないという状態にある。ここから、形骸群に属する選手に対して視覚探索運動の改善を促すためには、客観的なフィードバックによるアドバイスが必要となることが考えられる。

以上のことより、本手法は第三者からは観測しづらいサッカー選手の視野狭窄に対する適応戦略を明らかにし、今後の指導戦略を判断するための診断ツールとして利用できる可能性が示唆された。例えば、形骸群に属する選手に対しては、首振りの回数だけでなく、一回一回の範囲にも注目するよう指導を行う、慎重群に対しては、現在の首振りの範囲を維持しつつ、状況変化が激しい場面では首振りの回数を増やすことによって情報の更新頻度を上げるよう指導を行うなどが考えられる。これにより、一律の指導ではなく、選手ごとに効果的な指導を行うことが可能になる。

7. おわりに

本研究では、VR シミュレーションにおける視野狭窄の発生有無とその再現手法について検討を行い、疑似的に視野狭窄を実現する手法を提案した。この疑似視野狭窄提示は、周辺視野領域にぼかしをかけることによって実現される。

サッカーにおいて視野狭窄が選手の視覚探索運動に与える影響を明らかにする検証として、疑似視野狭窄提示を適用する条件と適用しない条件の双方でタスクを実施し、選手の視覚探索運動の頻度および質を表す左右の首振りの回数とその範囲を計測し比較した。これらの比較分析を通じて、サッカーにおける視野狭窄と視覚探索運動の関係を明らかにした。結果から、選

手が視野狭窄が発生している状況下でいかに状況を認識しようとするかという適応戦略について明らかにした。

本研究の一部は、JSPS 科研費 23K21685 の支援を受けて行われた。

文 献

- [1] Geert Jan Peter Savelsbergh, Sascha Haans, Margit Kirsten Kooijman, and Paulien Van Kampen, “A method to identify talent; visual search and locomotion behavior in young football players”, *Human movement science*, Vol.29, No.5, pp.764–776, 2010.
- [2] Andrew Mark Williams, Nicola Jane Hodges, Jamie Stephen North, and Gabor Barton, “Perceiving patterns of play in dynamic sport tasks: investigating the essential information underlying skilled performance”, *Perception*, Vol.35, No.3, pp.317–332, 2006.
- [3] Gershon Tenenbaum, “Expert athletes: an integrated approach to decision making”, *Expert performance in sports: advances in research on sport expertise*, Human kinetics, pp.191–218, 2003.
- [4] Aleksei Nikolaevich Krestovnikov (ソビエトスポーツ科学研究会訳), “スポーツの生理学”, 不味堂出版, 1939.
- [5] 石垣尚男, “視覚機能に及ぼす身体運動の影響: 運動中の視野狭窄について”, *体育学研究*, Vol.34, No.3, pp.245–253, 1989.
- [6] James Arthur Easterbrook, “The effect emotion on cue utilization and the organization of behavior”, *Psychological review*, Vol.66, No.3, pp.183–201, 1959.
- [7] 飯田雄介, 穴戸英彦, 亀田能成, “HMD を用いたサッカーのフリースペース認知における視覚探索行動の解析”, *電子情報通信学会技術研究報告 MVE*, Vol.121, No.53, pp.25–30, 2021.
- [8] Cesar Daniel Rojas Ferrer, Hidehiko Shishido, Itaru Kitahara, and Yoshinari Kameda, “Read-the-game: System for skill-based visual exploratory activity assessment with a full body virtual reality soccer simulation”, *PLoS ONE*, vol.15, no.3, pp.1–29, 2020.
- [9] 夏原隆之, 中山雅雄, 加藤貴昭, 永野智久, 吉田拓矢, 佐々木亮太, 浅井武, “サッカーにおける戦術的判断を伴うパスの遂行を支える認知プロセス”, *体育学研究*, Vol.60, No.1, pp.71–85, 2015.
- [10] Roel Vaeyens, Matthieu Lenoir, Andrew Mark Williams, and Renaart Philippaerts, “Mechanisms underpinning successful decision making in skilled youth soccer players: an analysis of visual search behaviors”, *Motor behavior*, Vol.39, No.5, pp.395–408, 2007.
- [11] Miguel Angel Recarte, Luis Miguel Nunes, “Mental workload while driving: Effects on visual search, discrimination, and decision making”, *Journal of experimental psychology*, Vol.9, No.2, pp.119–137, 2003.
- [12] Andrew Mark Williams, David Elliott, “Anxiety, expertise, and visual search strategy in karate”, *Journal of sport and experimental psychology*, Vol.21, No.4, pp.362–375, 1999.
- [13] Mark Wilson, Greg Wood and Samuel Vine, “Anxiety, attentional control, and performance impairment in penalty kicks”, *Journal of sport and exercise psychology*, Vol.31, No.6, pp.761–775, 2009.
- [14] 三上弾, 西條直樹, 高橋康介, “VR 技術を活用したスポーツトレーニングの試み”, *日本画像学会誌*, Vol.58, No.3, pp.316–323, 2019.
- [15] Shinya Ishikawa, Kenji Yoshida, and Yoshinari Kameda, “Quantification of visual search motion during basketball in VR simulation”, *12th international conference on sport sciences research and technology support (icSPORTS2024)*, pp.225–232, 2024.
- [16] Brian Guenter, Mark Finch, Steven Drucker, Desney Tan, and John Snyder, “Foveated 3D graphics”, *ACM transactions on graphics (TOG) - proceedings of ACM SIGGRAPH asia 2012*, Vol.31, No.6, pp.1–10, 2012.
- [17] Peter Jeffrey Burt, Edward Howard Adelson, “The laplacian pyramid as a compact image code”, *IEEE transactions on communications*, Vol.31, No.4, pp.532–540, 1983.