

ハイパフォーマンススポーツセンター／国立スポーツ科学センター

コーチングのための バイオメカニクス関連機器の 活用ガイドライン

ー位置とスピードの計測器を中心にー



目 次

Chapter 1

はじめに	4
------	---

Chapter 2

測定値に含まれる誤差	7
------------	---

Chapter 3

GPS (グローバルポジショニングシステム)	13
------------------------	----

1 基本原理、センサーの種別	13
2 仕様と出力結果のチェックポイント	15
3 活用時の留意点	16
(1) 位置と移動距離	
(2) 速度	
(3) 加速度	

【Column1】ボート競技におけるストローク中のスピード変化	24
---------------------------------	----

【Column2】サッカー競技におけるGPS機器の活用	25
-----------------------------	----

Chapter 4

LPS (ローカルポジショニングシステム)	26
-----------------------	----

1 映像によるトラッキング	26
2 電波によるトラッキング	28

【Column3】スピードスケートにおけるトラッキングシステムの活用	32
------------------------------------	----

Chapter 5

モーションキャプチャー	33
-------------	----

1 システムの種別	33
2 活用時の留意点	34
(1) 光学式モーションキャプチャー	
(2) 慣性センサー型モーションキャプチャー	
(3) 磁気センサー型モーションキャプチャー	

【Column4】ゴルフにおけるバイオメカニクスデータの活用	39
--------------------------------	----

【Column5】AIとバイオメカニクス	40
----------------------	----

参考文献	42
------	----

1. スポーツ界における計測機器の進化

昨今、スポーツ界では様々な簡便かつ軽量の測定機器が急速に普及しています。代表的なものとしては、手首に装着するだけで、移動距離、スピード、心拍数、消費カロリー、睡眠の質などが計測できるスマートウォッチが挙げられるでしょう。さらには各スポーツに特化したトレーニング量、関節への負荷、怪我のリスクなどを算出・評価してくれる慣性センサーも次々と開発されています(図1)。また、選手の移動軌跡やスピードを計測するGPSセンサーや、映像情報をもとに簡便に動作分析ができるようなバイオメカニクス関連機器も広まってきています(Chapter3・Chapter5参照)。これらの機器が普及している最大の理由は、使い方や結果の表示が直感的であるためだと考えられます。今後も次々と軽量で簡便な機器が開発されていくことでしょう。



図1 最近普及が進んでいる機器の例

2. 効果的に機器を活用するためには

使い方や結果の表示が直感的なために、ついつい計測値を鵜呑みにしてしまうという方も少なくないでしょう。しかし、あらゆる計測値には誤差が含まれているということに注意しなければなりません。計測値に無視できないほどの誤差が含まれている場合、値を鵜呑みしてしまうと誤った判断を下すことになります。そのため、機器から得られる計測値が本当に活用できるものなのか、慎重に検討する必要があります(これについてはChapter2で詳しく述べています)。

機器の入手・活用に関して陥りがちな流れと理想的な流れを図2にまとめてみました。現代は必要な情報を取得しやすいだけでなく、直接知りたいと思っていたわけではない情報も付随的に入ってくる時代と言えます。そのような情報に流されないためには、チームや選手が抱えるパフォーマンス改善のための課題にはどのようなことが考えら

れ、その課題自体や課題解決の過程を確認するためにはどのような機器が役に立ちそうかをあらかじめ考えることが重要です。加えて、コーチ自らが機器の仕様や計測値の算出過程を詳細まで調査することは難しいと思いますが、どのような仕組みで計測されているのかといったことに関心を向けるだけでも効果的な活用が期待できるでしょう。

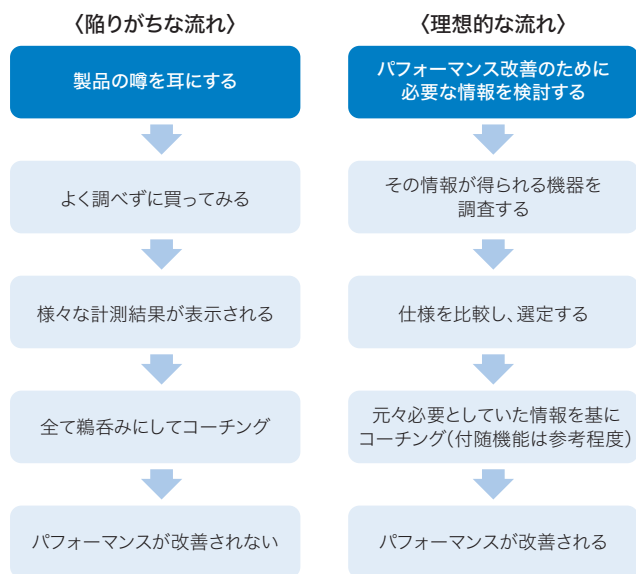


図2 機器の入手・活用のフロー

3. 本書の構成と対象範囲について

Chapter2では、まず測定値に含まれる誤差の種類や誤差との付き合い方について解説します。Chapter3からは、パフォーマンス分析や動作分析に関わる機器、特に選手の位置やスピードに関するものに焦点をあて、機器を選ぶ際に仕様のどのような点を見たらよいか、どのような誤差が含まれているのか、活用時にどのような点に留意すべきかといったことを述べていきます。Chapter3ではGPS（Global Positioning System）を取り上げます。GPSとは、人工衛星から電波を受信して位置情報を取得するシステムのことです。Chapter4では、LPS（Local Positioning System）を取り上げます。GPSと比べるとなじみのない用語ですが、主に屋内で、人工衛星を利用せずに映像や電波を用いて位置情報を取得するトラッキングシステムの総称です。そして、

Chapter5ではモーションキャプチャーシステムを取り上げます。動作解析のために身体各部の位置情報を取得するシステムのことで、スポーツのバイオメカニクスの分析における代表的な機器の1つです。身体の特徴点（関節など）にマーカーを貼付して複数のカメラからその位置情報を取得する「光学式」が一般的ですが（図3）、より簡便に計測できる「慣性センサー式」と「磁気センサー式」についても解説します。



図3 光学式モーションキャプチャー

本ガイドラインを読むことによって、図2の右チャートにおける「その情報が得られる機器を選定する」から「元々必要としていた情報を基にコーチング」までのステップを効果的に行えることが期待されます。本ガイドラインで紹介した機器は、スポーツのトレーニング・コーチング場面で用いる機器のほんの一部に過ぎません。しかし、誤差、精度、留意点に関する考え方は他の機器でも共通点が多いので、取り上げることができなかった多くの機器や、今後開発されるであろう新たな機器を活用するうえでも役立てられるものと考えています。

1. 誤差について

体重計に乗って繰り返し体重を測定した場合、市販の0.1kg刻みの体重計だと毎回ほぼ同じ値が表示されますが、病院にあるような精密な計測機器を使うと毎回わずかに異なった値が表示されます。この時、本当の体重の値（真値）は変化していないはずですから、毎回ずれた値が表示されていることになります。また、その時に着ている服の重さの分だけ、本当の体重の値に加算されています。このような、真値と体重計で測定された観測値との差のことを「誤差」といいます¹⁾。

誤差は大きく分けると2種類あるとされています。1つは、前述の例でいうと、体重計の測定値が毎回わずかに異なって表示される誤差のことで、これは「偶然誤差」といいます。もう1つは、服の重さの分だけ実際の体重よりも毎回大きく表示されるといったように値が一定の誤差のことであり、これは「系統誤差」といいます（図1）。

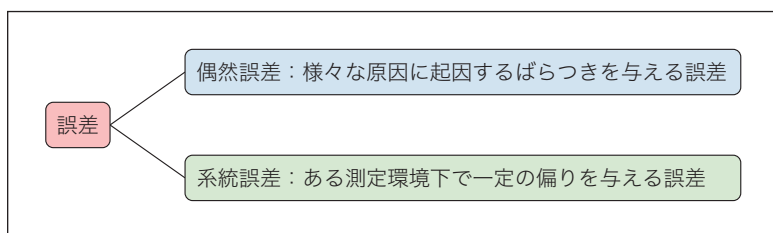


図1 誤差は偶然誤差と系統誤差に分解できる

偶然誤差は、我々がコントロールできない様々な要因によってもたらされるものであり、完全に取り除くことはできません。体重測定の例でいうと、静かに立っていたとしても我々の体は揺れているため、体重の値が毎回わずかに異なってしまいます。ですが、この体の揺れを完全に取り除くことはできません。また、偶然誤差は系統誤差と違い一定の値ではなく毎回ランダムな値をとるため、測定後にも取り除くことができません。ですが、測定方法自体を改善することによって、偶然誤差を小さくすることができます。

偶然誤差は毎回ランダムな値をとりながらも、そのばらつき方は一様ではありません。繰り返し何度も測定すると、偶然誤差の分布は正規分布に従うことが多いとされています（図2）。正規分布は平均値と標準偏差の2つの値を指定すると形が決定し、系統誤差が何らかの方法で取り除かれている場合は平均値と真値が一致します。偶然誤差の大きさは、一般的に標準偏差により算出されます。

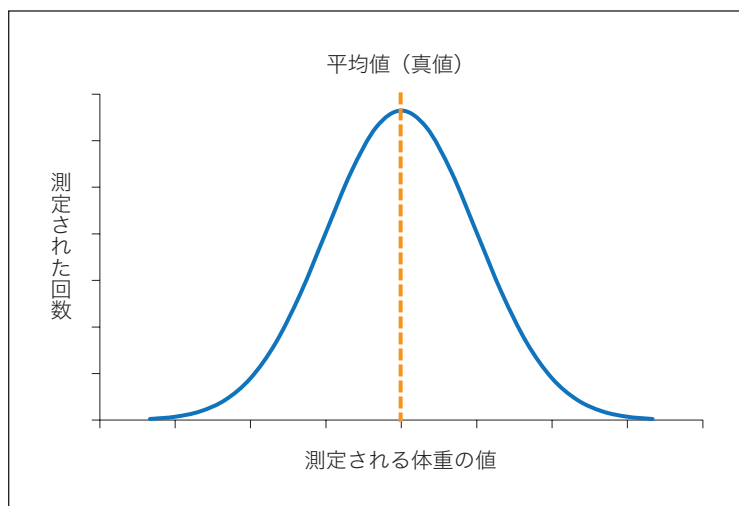


図2 偶然誤差の分布は正規分布に従うことが多い。系統誤差が取り除かれている場合は平均値と真値が一致する

系統誤差は、その原因が分かっている場合、測定値から取り除くことができます。前述の例でいうならば、服を脱いで測定するか、服の重さを測定して測定値から差し引くことで対処することができます。今回の例では、系統誤差の原因を簡単に特定することができるため取り除くことはできますが、一般的に系統誤差の原因を特定することは難しいとされています。そもそも、測定値に系統誤差が含まれているかどうかすら、わからないこともあります。しかし、原因さえ特定することができれば、系統誤差は原理的には完全に取り除くことができます。

2. 精度検証の概要

近年、技術の発展に伴い多くの測定機器が開発されています。当然のことながら、全ての測定機器がスポーツ現場やバイオメカニクス研究における有用性を想定したうえで開発されているわけではありません。中には、スポーツ現場やバイオメカニクス研究では活用できないほどの大きな誤差を含んだ測定値を生み出す測定機器もあるでしょう。そのため、測定機器を活用する前に、その測定機器から得られる測定値が活用に値するかどうか、つまり測定値の精度（妥当性と信頼性）を検証する必要があります。妥当性とは繰り返しの測定の中で各測定値がどのくらい真値に近いか、信頼性と

は各測定値がどのくらい一貫しているのかを示したものです。妥当性と信頼性の両方の意味合いが含まれたものを、ここでは「精度」と呼びます。

精度検証を行うには、まず真値を設定する必要があります。真値は、精度が保証されている測定機器から得られる測定値が主に設定されます。そして、精度が保証されている測定機器と精度検証をする測定機器とで同じ対象を複数回測定し、系統誤差を算出することで妥当性を評価します。

加えて、精度検証をする測定機器から得られる測定値の偶然誤差を算出することで信頼性を評価します。この信頼性は、特に「ユニット内信頼性 (intraunit-reliability)」と呼ばれており、1つの測定機器で測定を複数回繰り返した場合に、測定値がどのくらい一致しているかを示したものとなります²⁾ (図3:A)。複数の同じ測定機器における測定値がどのくらい一致しているかも精度検証において調べられることがあります。これは「ユニット間信頼性 (interunit-reliability)」と呼ばれており²⁾、ユニット間信頼性が高いことは、複数の同じ測定機器における測定値の一致度が高いことを意味します (図3:B)。ユニット間信頼性は、級内相関係数などを用いて評価されています。

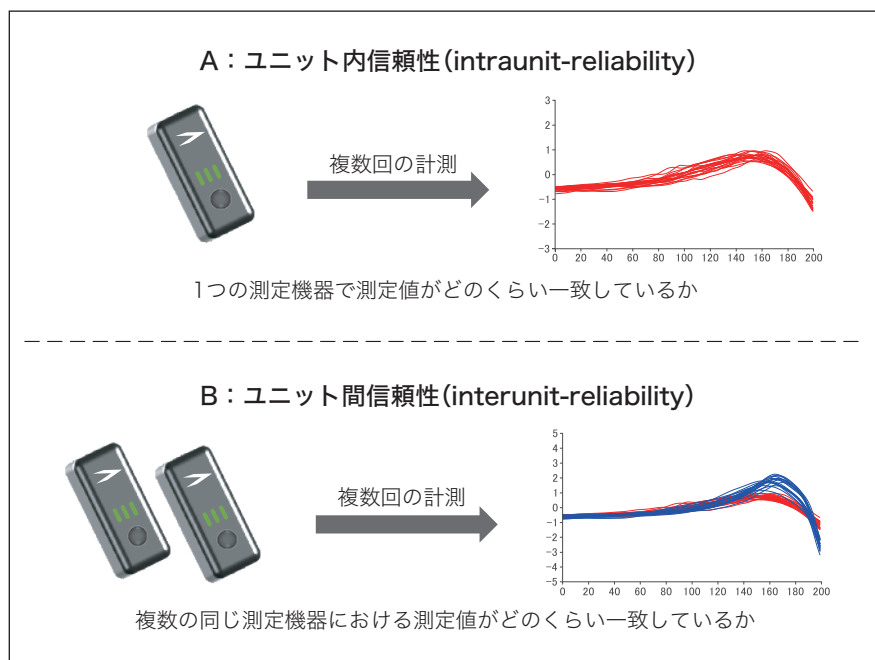


図3 ユニット内信頼性とユニット間信頼性

精度検証をするには、系統誤差を算出することで妥当性を評価し、偶然誤差を算出することで信頼性を評価すると説明しましたが、どのようにして測定値の妥当性や信頼性が評価されているのでしょうか。例として、動作解析の代表的な機器である光学式モーションキャプチャーシステム（Vicon Motion Systems 社製）の妥当性と信頼性の評価について考えてみましょう。長さが既に分かっているバー（基準値、320.880mm）を測定した場合、表1のような結果が得られています。VICONにより算出されたバーの長さの平均値は320.863mm、基準値との差分で示される系統誤差は0.017mmでした。また、標準偏差を用いて算出した偶然誤差は0.198mmでした。この測定値は計測環境（カメラの台数、測定範囲など）によって異なりますが、一般的に光学式モーションキャプチャーシステムから得られる測定値の系統誤差と偶然誤差は1mm未満であるといわれています^{3, 4, 5)}。測定値に1mm程度の誤差が含まれていることが原因で、研究における主張や結論が変わるとは考えにくいでしょう。そのため、光学式モーションキャプチャーシステムはバイオメカニクス研究において妥当性と信頼性が高い測定機器であるとされています。

表1 VICONに含まれる偶然誤差と系統誤差

基準値(測定するバーの長さ、Y、mm)	320.880
測定したバーの長さの平均値(X、mm)	320.863
測定値の系統誤差(X-Y 、mm)	0.017
測定値の偶然誤差(標準偏差、mm)	0.198

(<http://www.vicon.jp/accuracy/>) より一部改編

一方で、あるマーカースモーションキャプチャーシステムから得られる測定値の系統誤差と偶然誤差が40mmだったとします。測定値に40mmの誤差が含まれていると、明らかに間違った関節位置が推定されてしまうことが報告されています⁶⁾。そうなると、測定値に誤差が含まれていることが原因で研究における主張や結論が変わってしまう可能性があります。この時、マーカースモーションキャプチャーシステムはバイオメカニクス研究において妥当性と信頼性が低い測定機器と見なされます。他方、このマーカースモーションキャプチャーシステムを使用する目的が研究ではなく、アニメーションキャラクターの動作生成だったとしましょう。つまり、人間の動きをビデオ撮影し、その動きをアニメーションキャラクターで再現することだったとします。測定値

に40mmの誤差が含まれていたとしても不自然な動きをしているようには見えないことから⁶⁾、このマーカーレスモーションキャプチャーシステムはアニメーションキャラクターの動作生成という観点からは妥当性と信頼性が低いわけではないといえるでしょう。

このように、測定値を活用する目的に応じて、妥当性と信頼性の評価は変わってきます。そのため、目的によらず系統誤差や偶然誤差がある基準値を超えたら妥当性や信頼性が低いとみなし、ある基準値を下回ったら妥当性や信頼性が高いとみなす二値的な評価方法は適切とはいえないでしょう。評価において重要なことは、系統誤差と偶然誤差の値を目的と照らし合わせながら総合的に判断していくことです(図4)。

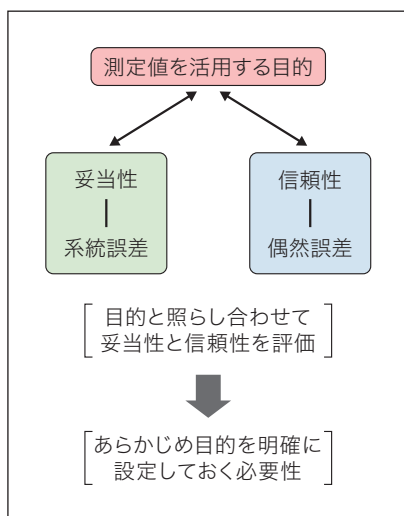


図4 妥当性と信頼性の評価方法

3. 誤差の許容度

測定値を活用するうえで、「どれくらい測定値に系統誤差や偶然誤差が含まれていたとしても許容されるか」という視点は重要です。例として、あるトレーニングの介入前後における測定値の変化量について検討する場合を考えてみましょう。測定値に系統誤差が含まれていることは、測定値が真値から一定量ずれていることを意味します。しかし、測定値に系統誤差が含まれていたとしても介入前後における測定値の変化量を検討するうえでは問題になりません。一方で、偶然誤差は介入前後における測定値の

変化量を検討することに影響を与えます。したがって、介入前後における測定値の変化量について確信を持つことができないほど偶然誤差が含まれている場合、検討は困難となるでしょう。このように、系統誤差や偶然誤差がどれくらい許容されるかは、固定的なものではなく測定値を活用する目的によって変わってきます。よって、あらかじめ測定値を活用する目的を明確にしておくことが必要となります (図 4)。

1. 基本原理、センサーの種別

■基本原理

GPS (Global Positioning System) は、正確にはアメリカが開発した衛星測位システムのことであり、人工衛星（以下、衛星）から発信された電波を使うことによって受信機（センサー）の位置を知ることができるシステムです。GPS 以外にも、ロシアの GLONASS（グロナス）、ヨーロッパの Galileo（ガリレオ）、日本の準天頂衛星システム「みちびき」などの衛星測位システムがあり、これらを総称して GNSS（Global Navigation Satellite System）といいます¹⁾。複数の GNSS を同時に用いることによって十分な数の衛星からの電波を受信することが可能となり、位置計測の精度が向上します。ただし、日本では GPS 以外のシステムを併用している場合も広義に GPS と呼ぶことが多く、本ガイドラインでも屋内でも使用可能な LPS (Local Positioning System) との対比としてすべての衛星測位システムを GPS と呼ぶことにします。

衛星から発信される電波には、衛星の軌道情報や原子時計の正確な時間情報などが含まれており、衛星から発信された電波が受信機に到達するまでの時間から衛星と受信機間の距離を求めることができます。さらに、複数の衛星から同時に計測した距離と衛星の位置情報をもとに連立方程式を解くことによって位置を知ることができます（図 1）。なお、屋内では衛星からの電波を受信できないため、GPS は使用できません。

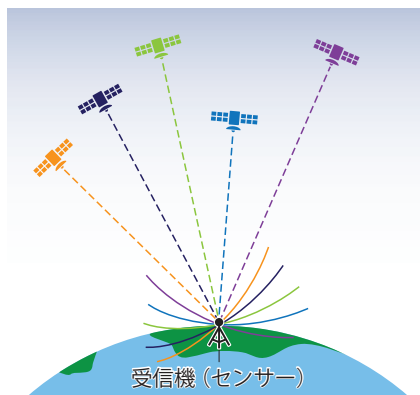


図1 GPSによる位置計測の方法

■精度に影響する因子

a) 使用される衛星の数

GPS による計測の精度を高めるうえで最も重要な点は、計測に使用されている衛星の数です。GLONASS、Galileo、みちびきといった複数の GNSS が活用できるシステムであれば、使用できる衛星数が増加します。

b) 使用される衛星の配置

様々な方向に位置している衛星から受信できていることも重要です。ビルや山などの遮蔽物が多い環境では高い精度は期待できませんが、これは使用される衛星の数の減

少に加え、似た方向の衛星ばかりを用いることになってしまうことも要因です。今いる地点で衛星がどの方向にどのくらいあるかがGNSSごとにわかるスマートフォンのアプリもあるので試してみると良いかもしれません。ただし、時々刻々、現在地に対する衛星の位置は変わるので注意が必要です。

c) 大気の状態

水蒸気や太陽の活動などの影響も受けるため、その仕組みは複雑ですが、ユーザーとしては上空が雲に覆われていると精度が低下することを念頭に置いておくとも良いでしょう。

d) 受信機の性能

受信機（センサー）の性能によって衛星-受信機間の距離の精度が変わってきます。これについては各製品のマニュアルにも詳細には書かれていませんが、年々センサーの性能が向上しているといわれています。

■センサーの種別

競技スポーツにおいてよく用いられているものの1つに、主にCatapult社製やGPSports社製（両社は後に統合）の製品に代表されるチームスポーツ用のシステムが挙げられます。選手が移動した距離と速度に関して選手間比較などを行えるソフトウェアが特徴です。移動距離や速度に関する検証研究の多くはこれらの製品によって行われています²⁾。

また、加速度センサー、ジャイロセンサー、磁気センサーなどを1つのパッケージに統合したセンサーユニットを慣性計測ユニット（IMU：Inertial Measurement Unit）と言います。GPSセンサーが付随しているIMUも多く存在します。

近年ではGPSセンサーが内蔵されているスマートウォッチも多く、運動時における移動距離やどの程度の速度域（高・中・低など）でどのくらいの時間移動したかといったことの評価が可能になっています。ただし、現時点でスマートウォッチに搭載されているGPSセンサーのサンプリング周波数（1秒間に計測されるデータの数）は低く、詳細なスピード変化を表示する機能までは備わっていないようです。

また、GPSセンサーとして販売している製品の中には加速度計や高度計が内蔵されているものも多いのですが、緯度・経度や速度情報はGPSから得られています。

さらに、基地局を設置してそこからの相対距離を求めることによって精度を高めようとするGNSSセンサー（例：Timbertech社製SN512）もあります。基地局設置に少し手間がかかる点やセンサーが比較的重い点は用途によってはデメリットといえますが、より高い精度が要求される場面に適していると思われます。国立スポーツ科学センターでは、好天が期待しづらい雪上種目でこのGNSSセンサーを活用して滑走軌跡などを算出しています。

2.仕様と出力結果のチェックポイント

■仕様のチェックポイント

a) サンプリング周波数

1秒間に計測されるデータの数のことで、「Hz（ヘルツ）」という単位で表記されます。一般に、高速の運動や方向変換をとまなう運動ではサンプリング周波数が高いほうが望ましいとされています（Chapter3-3 参照）。

b) 速度の算出方法

速度の算出方法には、位置を微分する方法（距離を時間で割るという考え方；以下、微分法）と衛星-センサー間の電波のドップラー効果を利用したドップラーシフト法の2つがあります。ドップラーシフト法のほうが精度が高いため、どちらの算出方法を用いているのかは重要ですが²⁾、製品の仕様書に書かれていない場合も多いようです。瞬間の速度や短時間（数秒間）における速度を計測したい場合には、事前にメーカーに問い合わせるなどして確認しておくことをお勧めします。

c) 使用している衛星測位システム

狭義のGPS（アメリカの衛星システム）のみを使用しているシステムよりも、GLONASS、Galileo、みちびきといった複数のGNSSを使用しているシステムのほうが衛星数の増加と精度の向上を期待できます。

d) 内蔵されている他のセンサー

GPSセンサーとして販売している製品であっても加速度センサーや高度計も内蔵されていることが少なくありません。加速度センサーが含まれていればコンタクトスポーツにおける衝撃の評価などが可能となり（Chapter3-3 参照）、高度計が含まれていれば高度の精度向上が期待できます。

e) 出力されるデータ

緯度・経度、速度などの計測結果に加え、実際に使用された衛星の数や「HDOP」（p16:b）を確認することができる製品であれば、高い精度が得られそうな測定環境であったかを確認できる点で望ましいと考えられます。

f) その他

精度には直接影響しませんが、重量、サイズ、電池・バッテリー、ソフトウェア、オプション機能なども確認しておくとい良いでしょう。

■精度に関連する出力結果のチェックポイント

a) 使用されている衛星の数

位置計測に使用されている衛星の数が10以上となる環境での計測を推奨している

製品が多いようです。あらかじめ計測したい地点で計測テストを行い、使用されている衛星の数をチェックしておくとう良いでしょう。

b) HDOP

水平精度低下率（HDOP；Horizontal Dilution of Precision）は、緯度・経度が精度よく計測できる環境であったかを知るために重要な指標です²⁾。主に衛星の数と衛星の配置によって決まり、値が低いほうが位置の精度が高い傾向にあります。位置の精度は、HDOPと衛星-受信機間の距離の誤差（受信機の性能などに依存）で決まります。具体的なHDOPの数値としては1.0未満が理想とされているようです。

3. 活用時の留意点

(1) 位置と移動距離

■チーム競技における移動距離

GPSで得られる基本情報の1つとして移動距離が挙げられます。一般に、GPSのサンプリング周波数は高ければ高いほど、計測時間は長ければ長いほど、移動速度は遅ければ遅いほど精度は高くなります（表1）^{2, 3)}。ただし、ここで言う精度の高低は誤差の比率（何%ずれるか）のことであり、何mずれるかということではありません。1ゲームの総距離といった長時間のデータであれば、1 Hzのチームスポーツ用GPSでも十分な精度が確認されていますが、誤差が数%に収まるという結果から概ね妥当だと判断されています。

表1 サンプリング周波数、計測時間、移動スピード、方向変換と距離の精度との関係

距離の精度	低い ←————→ 高い	
サンプリング周波数	低い	高い
計測時間	短い	長い
移動スピード	速い	遅い
方向変換	多い、急激	少ない、直線的

一方、方向変換を伴う短時間の高速移動では、1Hz、5HzのGPSにおいて10%以上の誤差が生じることが指摘されています³⁾。これは、図2のようにサンプリング周波数が小さい場合には実際の移動軌跡よりもショートカットした軌跡と判断されてしまうことが一因と考えられます。

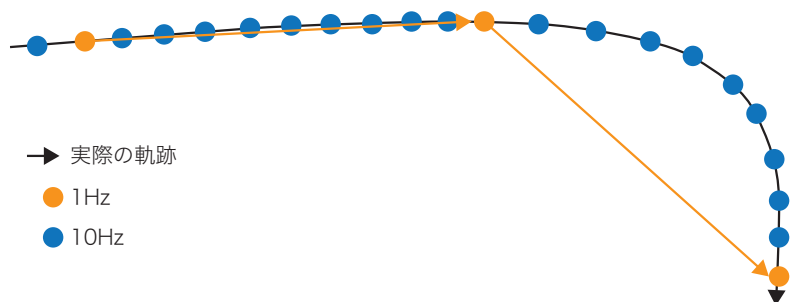


図2 サンプル周波数が低いと、高速の方向変換走で誤差が生じやすい

また、ユニット間の信頼性（Chapter2 参照）はユニット内の信頼性よりも低いといわれていることから³⁾、同じ選手にはいつも同じ番号のセンサーを装着するようリストを作っておくと良いでしょう。このことによって、同一選手のセット間やゲーム間の移動距離の比較が行いやすくなります。

■実際は静止しているのに動いてしまう？

私たちはチームスポーツでよく使われている比較的最新のGPS（Vector X7、Catapult社製；10Hz）センサー2つを5分間地面に置いて、その時の座標値を計測し続けるというテストを実施しました。雲はほとんどなく、使われた衛星の数やHDOPも基準を満たしていました。しかし、1mを超えるような範囲で徐々に動いているという結果となりました（図3上）。そして、2つのセンサー間の距離は真値（4.75m）よりも小さく、しかも2つのセンサーの座標値が同じように推移したわけではなかったため、センサー間の距離も一定ではありませんでした（図3下）。静止しているといっても実際には地球も衛星も常に動いているので、GPSで完璧に位置を特定するというのは簡単なことではないようです。

この結果から、以下の2つのことがいえそうです。1点目は、GPSは移動距離やスピード（後述）を評価するには適していても、フィールド内で今どこにいるのかについてはメートル規模の誤差があるということです。例えば、サッカーにおいてペナルティーエリア内にどのくらいの時間いたかを正確に知ることは難しいといえるでしょう。2点目は、ゲーム中の選手間の位置関係に関してです。複数の選手が密接しているときに、選手間距離が50cmなのか1mなのかといった評価はGPSでは難しいといえるでしょう（図4）。ただし、5m離れているのか10m離れているのかといった程度なら最新のGPSであれば十分評価できると考えられます。

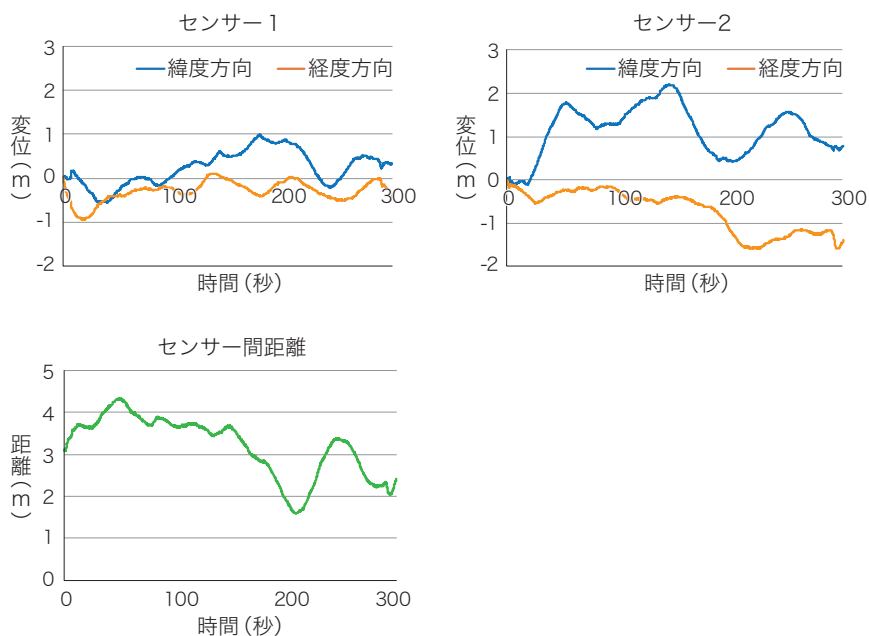


図3 地面に固定したセンサーの座標値(計測開始時を0として)とセンサー間距離



図4 GPSで選手間の距離を適切に評価することは困難

■高度について

GPSの中には高度の情報も取得できるものがあります。しかし、水平面内と比べて高さに関する精度は低いことが知られています。高度計が内蔵されていると高度の精度も高くなりますが、いずれにせよ、ジャンプしたときの高さを計測できるような精度はないといってよいでしょう。市販されているGPSでは、サイクリングロードなどにおいてどの程度登ったかを数十m単位で大雑把に把握する程度の活用にとどめるのが良いでしょう。また、GPSで表示される高度は「標高」とは基準が異なるため、そのまま比較できない点にも注意が必要です。

(2) 速度

■微分法とドップラーシフト法

Chapter3-2で述べたように、速度の算出方法には微分法とドップラーシフト法の2つがあり、一般的にドップラーシフト法のほうが精度が高いことが知られています⁴⁾。ドップラーシフト法はサンプリング周波数の影響を受けないので、サンプリング周波数が少なくてもその瞬間瞬間の速度としては比較的信頼できます。一方、微分法ではChapter3-3-(1)の距離の精度と同様に、サンプリング周波数が高いほど望ましく、方向変換を伴うと特に精度が低下します^{3, 5)}。現在市販されているGPSであれば、微分法であったとしても、速度を数段階に分けて速度域ごとの運動時間を評価するといった活用であれば問題ないと思われますが、詳細なスピード変化を評価することは難しいでしょう。

■先行研究から言えること

精度検証に関する先行研究の多くがチームスポーツ用の製品（特にCatapult社製もしくはGPSports社製の製品）を取り上げています³⁾。これらはドップラーシフト法によって速度が算出されているようです。これらの機器を光電管、光学式モーションキャプチャーシステム（VICON）、レーザー式速度測定器（LAVEG SPORT LDM 300C；JENOPTIK社製、以下、LAVEG）と比較することによって妥当性を調査した研究が多く報告されています。平均速度に関しては、1Hzの比較的旧式のセンサーであっても、よほど短い距離（例えば10m程度）のスプリントでなければ十分な妥当性が得られています。ピーク速度に関しては、サンプリング周波数が高くなるにつれて妥当性、ユニット内信頼性、ユニット間信頼性が高くなることが指摘されています。しかし、サンプリング周波数自体の影響というよりも、開発が進んでセンサーの受信感度やアルゴリズム（計算方法）などの進歩の影響が大きいようです⁶⁾。

また、特にサンプリング周波数の小さい旧式のシステムの場合には、ユニット内信頼

性がユニット間信頼性よりも高いことから、速度についても距離と同様に同じユニットを使い続けることが推奨されています。

■私たちの検証結果から言えること

私たちは静止時の座標値検証（Chapter3-3-(1) 参照）で扱ったGPS（Vector X7）を用いて、速度に関しても検証を行いました。Vector X7ではドップラーシフト法によって速度が算出されています。人の歩行・走行だけでなく、安定した走行が可能な三輪バイクを用いてLAVEGと比較しました。さらに、バイク上部に並行して2つの同種のセンサーを取り付けることによって、ユニット間の信頼性についても検証しました（図5）。



図5 三輪バイクを用いたGPSセンサーの精度検証

その結果、平均速度、ピーク速度、速度パターンいずれもほとんどLAVEGに対する誤差がありませんでした（図6）。平均速度については大きな誤差はないと予想していましたが、ピーク速度の誤差についても0.1m/s未満に収まっており、系統誤差（過大評価や過小評価）もありませんでした。また、ユニット間誤差の検証結果を図7に示しました。左図においては線が2本あるように見えないのは、2つのセンサーの速度がほとんど一致していたためです。平均速度、ピーク速度ともに2つのセンサーが示す値は全くといってよいほど一致し（23回測ってすべて0.03m/s以内）、ユニット間誤差は無いと判断できました。

一方、歩行・走行といった身体運動の場合は、三輪バイクの場合よりもLAVEGとの差が大きくなりました。今回の歩行・走行試技では、LAVEGで腰部付近を追尾し続けましたが、身体運動において一箇所を正確に追尾し続けることは困難です。三輪バイクではLAVEGとGPSの速度の差がほとんどなかったことも考慮すると、身体運動における両計測機器間の速度の相違は、GPSセンサーの誤差とは言えないと考えられます。

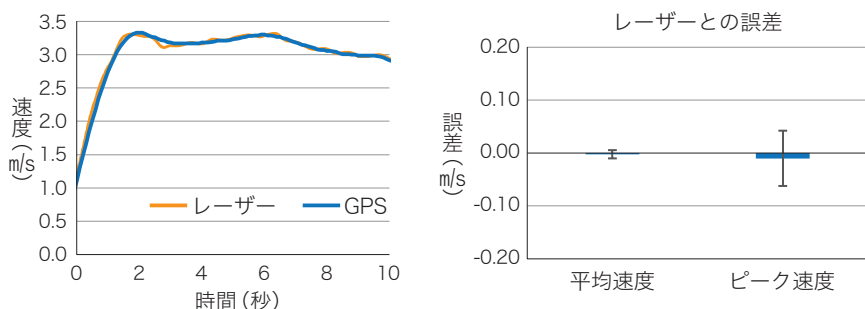


図6 三輪バイク走行におけるレーザー式速度測定器 (LAVEG) とGPSの速度 (時速10km試行: 左図) とLAVEG速度に対するGPS速度の誤差 (23試行の平均: 右図)

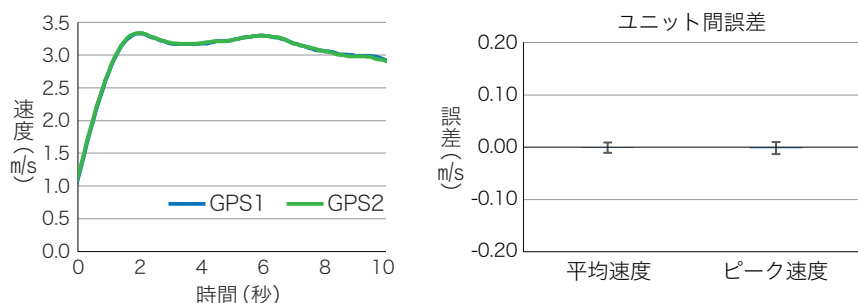


図7 三輪バイク走行における2つのGPSの速度 (時速10km試行:左図) と両GPS速度のユニット間誤差 (23試行の平均: 右図)

以上のことから、今回取り上げた最新型のGPSセンサーでは、天候等の測定環境に問題がなければ平均速度やピーク速度を正確に計測できるといえます。ただし、GPSセンサーによって出力される速度はあくまでセンサー自体の速度であって、アスリートの身体重心の速度ではない点には注意が必要です (図8)。例えば、ランニング1サイクル中の速度変化を見ようとする場合、GPSセンサーによって出力されるピーク速度や速度の波形は身体重心の値とは一致しません。また、ブレーキや加速の大きさを評価したい場合には、ランニング専用の加速度センサーを含むIMUのほうが適しているでしょう。



図8 身体重心ではなくセンサー自体のスピードであることに注意しましょう

(3) 加速度

■加速度とは

GPSで得られる情報の1つに加速度があります。加速度とは、単位時間あたりの速度の変化量のことです。この加速度には、スプリントのスタートのように速度が増加する場合だけでなく、図9のようにタックルなどによって速度が変化する場合も含まれます。外部から物体（選手）に力が作用したときに、その力の大きさに比例し、物体の質量（選手の体重）に反比例する加速度が物体（選手）に生じるため（ニュートンの第2法



図9 タックルによって両選手に力が作用し、加速度が生じる

則）、選手に生じた加速度を計測することは、選手に作用した力の大きさを知ることに関わり、身体への負荷を推定することなどに役立ちます。加速度はGPSで得られた位置情報から計算されることもありますが、多くのGPSの受信機には加速度センサーが内蔵されており、その加速度センサーから得られたデータが活用されています。

■GPSの受信機に内蔵された加速度センサーの精度

統制された実験環境下で、GPSの受信機に内蔵された加速度センサーの精度を調べた研究によると、ユニット内信頼性とユニット間信頼性はともに高かった一方で、受信機内蔵の加速度センサーの値は、基準となる精度の高い加速度センサーで計測された値（真値）よりも約30%小さかったことが報告されています⁷⁾。このことから、受信機内蔵の加速度センサーの妥当性は高いとは言えず、特別なデータ処理をしない限り運動中の選手の加速度や選手に作用した力の絶対的な大きさを正確に求めることは難しいでしょう。

■GPSの受信機に内蔵された加速度センサーのスポーツ現場での活用方法

上述したように、受信機内蔵の加速度センサーの妥当性は高くないですが、全く役に立たないわけではありません。ここでは、ラグビーのようなコンタクトスポーツにおいて、受信機内蔵の加速度センサーの検証を行った研究とその活用方法を紹介します。

コンタクトスポーツのタックルにおいて、受信機内蔵の加速度センサーから得られた衝撃値（G：加速度の値を重力加速度[約9.81m/s²]で除した値）を、ビデオ映像に

よって分類した3つの強度（低強度、中強度、高強度）間で比較した研究によると、高強度に分類されたタックルは、低強度あるいは中強度に分類されたタックルよりも衝撃値が大きかったことが報告されています⁸⁾。このことから、受信機内蔵の加速度センサーを使うことによって、タックルなどによる衝突の強度を大まかに分類することはできるといえます。実際に、ラグビーのあるゲーム分析では、衝撃値の大小を基に、タックルなどによる衝突を複数のゾーンに分類し、10G以上の衝撃値が記録された場合に高強度の衝突が行われたとみなしています⁹⁾。このように、受信機内蔵の加速度センサーによって得られたデータから、身体の衝突をゾーンごとに大まかに分類し、試合中に高強度の衝突が起こった回数や頻度を求めることによって、身体へのおおよその負荷を推定することができます。

ボート競技におけるストローク中のスピード変化

GPS（ドップラーシフト法）機器はチームスポーツで多く活用されていますが、スピードを競う個人スポーツでも用いられることがあります。ボート競技ではGPSを用いて速度を計測することがしばしばあります。

図1は、シングルスカルスのストローク中の速度を示したものです¹⁰⁾。なお、このデータはGPSで算出したのではなく、インペラーと呼ばれるプロペラ型のセンサーを艇の下面に取り付けて計測したのですが、GPSでも類似したデータが得られることが確認されています。

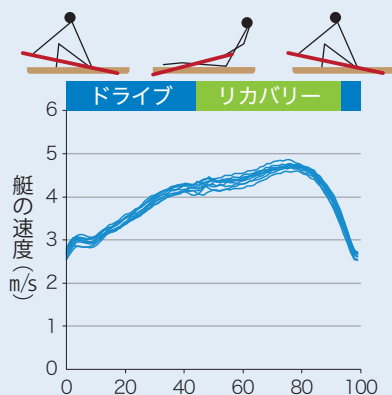


図1 シングルスカルにおける1ストローク中のスピード変化
(横澤と中村 2020 改変)

図を見ると、ドライブ局面（漕いでいる間）で加速しますが、ピーク速度はリカバリー局面、つまりオールが水から外に出ている局面で出現していることが分かります。漕いでいない局面で速度が増加しているのは不思議に思われるかもしれませんが、ここで注意すべきなのは図に示されているのはあくまで艇の速度である点です。艇と漕手全体（の重心）がリカバリー局面で加速することはありません。リカバリー局面では膝を屈曲しながら漕手が艇に対して進行方向と反対に（図1のイラストでは左方向に）移動していくのですが、その時に艇は選手から進行方向（図では右方向）に押されるので一時的に加速するのです。選手ではなく艇がゴールラインを早く通過することが重要なので、ゴール瞬間は漕ぐのを止めて身体を進行方向と反対に寄せたほうが有利かもしれません。

サッカー競技におけるGPS機器の活用

チームスポーツにおいて、GPS機器はトレーニングや競技中の運動負荷をモニタリングするためのツールとして広く利用されており、映像トラッキングシステムから得られる戦術データと併せてシーズンを通したコンディショニングに活用されています。

生体へのトレーニング負荷は、「内的負荷（Internal load; IL）」と「外的負荷（External load; EL）」にわけて考えることができ、ILは心拍数等の生理学的指標や生化学的指標、主観的指標などから、ELはGPSデバイスから得られる総移動距離や各速度区分での移動距離、スプリント回数などから評価することができます。

図1は、サッカー男子U-23日本代表選手を対象とした、10日間のリオオリンピック直前合宿における選手別の総移動距離（A）と21km/h以上の移動距離（B）の積算を示しています¹⁴⁾。

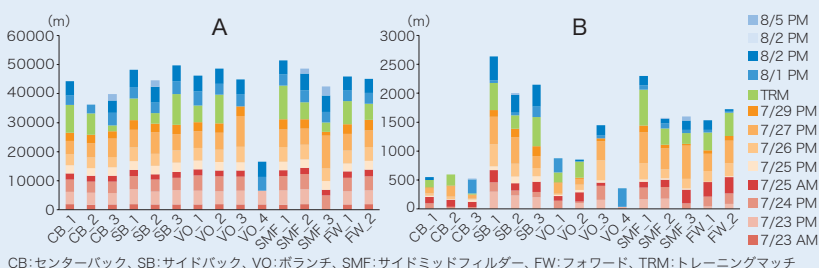


図1 合宿期間中における選手別の総移動距離（A）と21km/h以上の移動距離（B）
中村ら（2019）¹¹⁾を改変

合宿を通して、ポジション別の平均総移動距離には差が認められませんが、選手個別の総移動距離（A）や高強度の移動距離（B）の積算は大きく異なることがわかります。例えば、大会期間中に「体調不良」「筋・関節の違和感」を訴えたSMF_1選手は、合宿を通して総移動距離も多く、高強度の積算移動距離が同ポジション内の選手と比べても多かったことから、トレーニング量と強度を落として調整するなど個別に対応し、大会期間中コンディショニングを維持することができました。このように選手個々にILとELの両方からモニタリングすることは、怪我の予防やフィジカルフィットネスの維持、パフォーマンス発揮のための一助となり、非常に有用です。

GPSが人工衛星を活用して位置情報を取得しているのに対し、LPSでは映像や電波を利用して位置情報を取得します。また、映像や電波で移動する物体を追跡することをトラッキングと表現します。本章では、映像によるトラッキングと電波によるトラッキングについて、順に概要や留意点を解説します。

1. 映像によるトラッキング

■映像によるトラッキングシステムの特徴

映像によるトラッキングは、図1に示すように、対象物体（選手やボール）をカメラで撮影し、画像処理により各対象物体の位置を特定する手法です。サッカーやバスケットボールの国際大会やプロリーグでは、テレビ放映や公認スタッツデータの取得のために導入が進んでいます。また、競技団体によっては、試合や練習で測定を行い、取得したデータを競技者や指導者などにフィードバックして、競技力向上に利用しています。利点として、選手に機器やマーカーを装着する必要がないため、選手への負担が少ないこと、屋外・屋内に限らず利用可能であること、選手のみならず、ボールなどの競技用具をトラッキング可能であることなどが挙げられます。

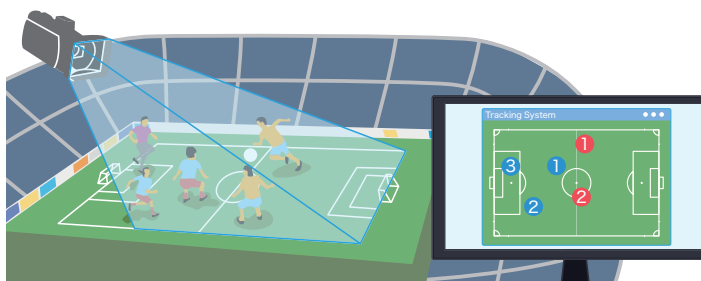


図1 映像によるトラッキングシステムのイメージ

■映像によるトラッキングシステムの留意点

測定に関する留意点

映像を利用するため、カメラで撮影できる範囲がトラッキング対象となります。大きなフィールドで実施するロードレースやアウトドアの競技には、あまり適していません¹⁾。映像の撮影には家庭用カメラではなく専用カメラを使用し、また、カメラを固定して使用することが一般的です。

競技や目的、環境に応じて、使用するカメラの台数やその配置は様々です。サッ

カーやバスケットボールを対象に普及が進んでいるシステムとして、TRACAB（ChyronHego社）やSportVU（STATS社）が挙げられます。TRACABでは、サッカーの場合16台のカメラを用いて測定し、SportVUでは、バスケットボールの場合6台のカメラを用いて測定しています。

精度に関する留意点

TRACABでは、事前に設定されたコースにおける走行や少人数でのゲーム環境下において、光学式モーションキャプチャーシステム（VICON）の測定値を基準として、位置の二乗平均平方根誤差は0.08m、速度の二乗平均平方根誤差は0.08m/s、総移動距離の誤差は $0.27 \pm 0.35\%$ であったと報告されています²⁾。これは、GPSや電波によるトラッキングシステムと同等以上の精度です。

しかし、対象物体を映した映像の状態によって、精度が低下する可能性があります。例えば、図2に示すように、サッカーやバスケットボールにおいて、ゴール周辺などで選手が密集している状況では映像上で選手が重なりあうため、それぞれの選手を正確に分離できず、トラッキングを失敗することがあります。選手を検出できないこと、一人の選手を複数人であると誤検出すること、トラッキング中に選手が入れ替わることなどが挙げられます。これらは、選手に機器やマーカを装着するトラッキングシステムでは生じないため、映像によるトラッキングシステム特有の課題と言えます。また、雨や雪などの天候、夜間の暗み、照明のフリッカー（明滅）、観客を含む背景などの影響によって、ユニット内の信頼性が低下することがあります³⁾。先ほど紹介した映像によるトラッキングシステムの精度は、これらの状況を含まない場合の精度となります。

そのため、精度を求められる用途においては、訓練されたオペレーターが手動でトラッキングデータの修正を行っています。トラッキングデータを利用される際には、データが修正済みか否かを確認することをお勧めします。

サンプリング周波数に関する留意点

映像によるトラッキングシステムのサンプリング周波数は、10～30Hzの範囲で、一般的なGPSのサンプリング周波数よりも高いことが報告されています⁴⁾。したがって、サンプリング周波数の観点からは、映像によるトラッキングシステムはGPSより、方向変換を



図2 精度が低下しやすいシーンの例

伴う移動の測定に適しているといえます。

2. 電波によるトラッキング

■システムの概要

電波によるトラッキングの仕組みは、基本的にGPSと類似しています。GPSにおける衛星がLPSではアクセスポイントに相当し、GPSと同様、小型のデバイスを身体に装着して位置の計測を行います。無線LAN、Bluetooth、レーザーなど、様々な電波によるトラッキングシステムがありますが、近年のスポーツ界では、超広帯域（Ultra Wide Band）という数ギガHzの周波数帯の電波を用いたシステム（以下、UWB法）が主流になっています。また、GPSと同様、各選手がデバイスを装着するため、この方法では対象を誤認識することがありません。

UWB法では、計測エリアの周囲に専用のアンテナを複数台設置し、最低3台のアンテナがデバイスの信号を受信することにより、デバイスの位置を特定することができます。したがって、アンテナがデバイスの信号を受信できるエリア（数m～数十m）しか測定をすることができませんが、屋外でも屋内でも計測をすることができます。また、事前に計測エリアの座標を構築するためのキャリブレーションが必要です。キャリブレーションの方法は製品によって異なりますが、コートの外周や四隅など、予め位置関係が分かっているポイントやラインにデバイスを置くことによって設定します。GPSと異なり計測可能エリアが限られているので、計測可能エリアがどこからどこまでかを認識しておくことが重要です。

UWB法もGPSと同様に、各社が開発した専用のソフトウェアで、チーム競技のゲーム中やトレーニング中における一人ひとりの選手の移動距離や速度を即時的に確認することができます。下記に、UWB法の特徴を紹介します。

■UWB法の精度

GPSでは衛星と地上という非常に長い距離で通信を行いますが、UWB法ではコートの周囲にアンテナを設置して近距離から位置を検出するため、一般的に位置の精度はGPSより高いと考えられています。第3章で紹介したように、GPSでは静止させたデバイスの位置情報が数m動いていたことが報告されていますが、UWB法では1cm以下しか動きません。しかし、設定環境によって精度も変わってきます。計測エリアの大きさに対してアンテナの数が少ない場合や、計測エリアの端では妥当性と信頼性が低くなってしまいます。製品にもよりますが、製造元が推奨するアンテナの設置方法やキャリブレーション頻度を順守する必要があります。

歩行や走行などの動的条件でも妥当性は高く、移動距離や平均速度の誤差は5%以内です。一方で動作課題や製品によって結果は異なるようですが、ピーク速度は直線走で5%以内、方向転換走では10%以上という報告があります。また、瞬間的な位置や速度、加速度は誤差が大きいことが報告されています⁴⁾ので、現在のところ移動距離や平均速度の評価に留めておいたほうがよいでしょう。以下に、考えられる誤差の要因を記します。

■ UWB法で瞬間的な変数の精度が悪くなる要因

UWB法のサンプリング周波数は、そのほとんどが20-100HzとGPSよりも高く、選手の移動速度などを精度よく追跡するためには十分です。しかし、取得した時系列データを見てみると、欠損や外れ値が生じることが報告されています^{5, 6)}。またサンプリング周波数が一定ではない場合や、位置座標に時間遅れが生じる場合があることも指摘されています。これらのことにより、瞬間的な移動速度や加速度の精度が低くなることが考えられます。こうしたことは、今後の改良によって改善される可能性があります。

私たちは光学式3次元モーションキャプチャーシステムとUWB法（ZXY ARENA、ChyronHego社製）を用いて位置の誤差を検証しました。腰部にデバイスを取り付け、その上に赤外線反射マーカーを貼り、方向転換走を行い、位置や速度を比較しました。そしていくつかの特徴が明らかになりました。十分なサンプリング周波数（100Hz）にもかかわらず、生データの軌跡が非常に滑らかな点には注意が必要です。例えば、疾走中、身体重心は1歩毎に加速と減速を繰り返し、接地前半に減速して接地後半に加速します（図3）。ハイスピードカメラを用いた分析ではそのような1歩毎の速度変化を追うことができ、20Hz以上で計測しているLPSでも、理論的には同じような速度変化を追うことが可能です。しかし、現在のシステムではそのような細かな速度変化を追うことはできないようです（図3）。このような特徴により、ピーク速度を過小評価したり、瞬間的な速度に誤差が生じたりする可能性があります。また、移動軌跡をみても、急激な方向転換局面で特に誤差が生じています（図4）。例えば、180度の方向転換局面では、LPSデバイスの軌跡はモーションキャプチャーで得られたマーカーの軌跡よりももっと「短く」なっています。また、90度の方向転換でも、LPSデバイスはより「なめらか」な軌跡を描いていることがわかります。このような特徴は他のUWB法を用いた製品でも報告されています。こうしたデータでは、方向転換の素早さや加速を評価するのは難しいでしょう。サンプリング周波数は十分に高いので、何らかのソフトウェア上の処理による特徴だと推測できますが、将来的にはフィルタなどソフトウェアの改良によって改善されることが期待されます^{7, 8)}。

■高さや方向について

電波によるトラッキングシステムの中には高さの情報も取得できるものがあります。しかし、試合中のジャンプ高（最大努力で50cm程度）を精度よく計測したり、毎回のジャンプ高などを検出してトレーニング負荷として活用したりするためには、さらに精度が高くなる必要があります。また、進行方向を定量化するソフトもあり、サイドステップやバック走などの移動様式を分類してくれることが期待されますが、現在検証された文献はありません。

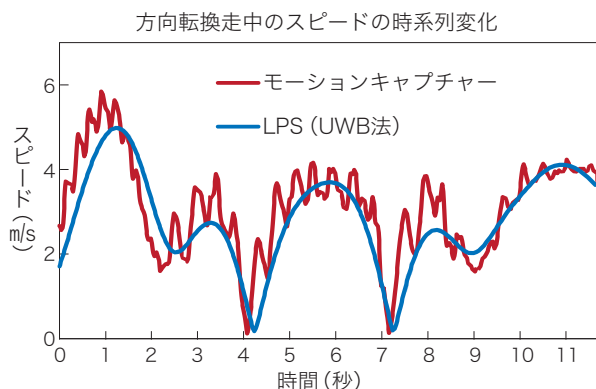


図3 腰部に取り付けたLPSデバイスとマーカースの方向転換走中のスピードの変化の例。UWB法では、一歩毎の加減速を追うことはできず、また時間ずれや加速局面における速度の立ち上がりの遅さがみとれます。

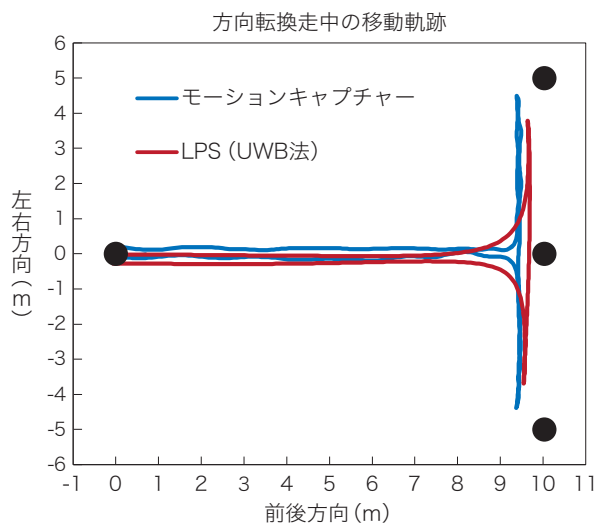


図4 腰部に取り付けたマーカー（モーションキャプチャー）とLPSデバイス（LPSのUWB法）の方向転換走中の軌跡。●は走路に設置したコーンの位置で、コーンをタッチして次のコーンまで移動するため、腰部のマーカーはコーンの位置まで達していませんが、180度方向転換局面では、LPSデバイスの軌跡はマーカーの軌跡よりもっと「短く」なっています。また90度の方向転換でも、LPSデバイスはより「なめらか」な軌跡を描いていることがわかります。

スピードスケートにおけるトラッキングシステムの活用

私たちは、長野市オリンピック記念アリーナ（エムウェーブ）のコース全周の直上に28台のカメラを設置し、選手の頭部を自動的に追尾し、スタートからゴールまでの滑走軌跡とスピードを算出できるシステムを構築しました(図1)⁹⁾。



●カメラ

図1 システム概要

(横澤ら2018)

国際競技会における男子5,000mレースの滑走スピード変化の例を図2に示しました。「カーブ」と書かれているのはカーブ出口のスピード、「ストレート」と書かれているのはストレートの出口のスピードを示しています。どのデータもジグザグになっていますが、これはストレートで減速し、カーブで加速していることを示しています。そしてメダリストのようにスピードの増減が小さい（ストレートの減速が小さく、カーブの加速も小さい）選手ほどレース後半までスピードを維持して好記録になっていることが分かりました。そして、図の日本選手にとっての課題はストレートの減速を小さくすることにあると考えられます。

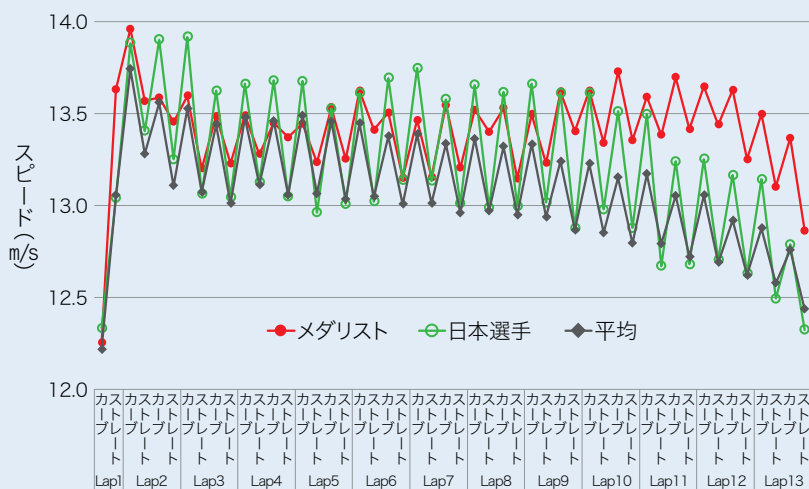


図2 男子5,000mにおけるストレートとカーブのスピード変化

(横澤ら2018改変)

1. システムの種別

動作解析のために身体各部の位置情報を取得する3次元モーションキャプチャーシステムには様々な様式のものがあり、コーチングや研究の現場で活用されています。その中で最も広く認知されているのは、カメラを搭載した「光学式モーションキャプチャー」です。また、近年では慣性センサー（一般に加速度、ジャイロ、地磁気センサー）を搭載した「慣性センサー式モーションキャプチャー」や、磁気センサーを搭載した「磁気センサー式モーションキャプチャー」も用いられるようになってきています。どのシステムを用いる場合も、留意すべきことは、各々のシステムではどのようなデータが計測され（計測データ）、そこからどのようなデータが計算されたのか（計算データ）を知っておくことです。「計測データ」とは計測器ごとに得られる一次情報、「計算データ」とは一次情報を計算処理して得られる二次情報を指します。基本的に、計算データには演算に伴う誤差が生じます。以下に、各システムの特徴を、①データ収集に用いる機器、②分析対象者（選手や被検者）に対する準備、③計測データ、④特徴、の4つの観点から簡単に記します。

■光学式モーションキャプチャー

- ① 光学式カメラ
- ② カメラから照射される光に反射する特殊なマーカーを身体各部や用具に貼付
- ③ 位置座標データ
- ④ 精度が高い／屋外（日中）では精度が低下／準備に時間を要する／高額

■慣性センサー式モーションキャプチャー

- ① 慣性センサー（通常、慣性センサーには、加速度・ジャイロ・地磁気センサーが内蔵）
- ② 分析対象の身体部位、用具に慣性センサーを取り付ける
- ③ 加速度・角速度・方位（地磁気）データ
- ④ 場所を選ばない／準備が比較的容易／比較的安価

■磁気センサー式モーションキャプチャー

- ① 磁気センサー
- ② 分析対象の身体部位や用具に磁気センサーを取り付ける
- ③ 位置座標および各センサーの方位データ
- ④ 場所を選ばない／準備が容易／比較的安価／計測範囲が限定的

2. 利用時の留意点

(1) 光学式モーションキャプチャー

Chapter2で紹介した通り、光学式モーションキャプチャーで測定したデータに含まれる系統誤差および偶然誤差は小さく、光学式モーションキャプチャーはモーションキャプチャーシステムのゴールドスタンダードとされています¹⁾。当方式では、まず、カメラが特定の光を照射し、マーカーで反射した光（もしくはマーカーが照射した光）をカメラが感知することによって、マーカーの2次元座標値を取得します。そして、複数台のカメラが異なる向きから同時に同じマーカーを感知することで取得した“各カメラのマーカーの2次元座標”と、マーカー間の位置関係が既知の校正器を用いて数学的に算出した“各カメラの変数（位置や角度）”を組み合わせることで、マーカーの3次元座標値を算出しています^{2, 3)}（図1）。

■利用する際の留意点

光学式モーションキャプチャーで肩甲骨の挙動を記述した研究によると、皮膚に貼付したマーカーを用いて推定した肩甲骨の回転運動は、触診して実測した角度と5～7度異なることが報告されています⁴⁾。この現象は、肩甲骨と皮膚が密着しておらず、肩甲骨の動きに皮膚が完全に追従しないために生じるものです。バイオメカニクス研究における主要な分析点は骨の表面上にあることが多いのですが、この肩甲骨の例のように、骨の動きと皮膚の動きにはずれがあることを考慮して、骨の動きを適切に反映する皮膚上の特徴点にマーカーを貼付することが重要です。

また、カメラにおける信号処理の関係上、一般的にサンプリング周波数を上げると、1台のカメラで撮影できる範囲（画角）が狭くなることに注意が必要です³⁾。当方式では、2台以上のカメラが同時に光を感知しなければ、マーカーの3次元座標値を推定することができません。よって、複数台のカメラがマーカーを絶え間なく感知することが、測定精度を高めるためには必要であり、カメラの台数を増やすことで測定精度は向上することが報告されています⁵⁾。ただ、カメラを増やすと準備の手間も増えるので、対象とする動きの速さと範囲に応じて、サンプリング周波数やカメラの台数などを調整しましょう。

加えて、マーカーの3次元座標値は、校正器を利用し算出したカメラ変数に基づいて算出されています。よって、校正後にカメラ変数が変わらないよう、カメラを強固に固定したり、カメラにヒトやモノが接触しにくい場を作ったりするなどの対策も重要です。

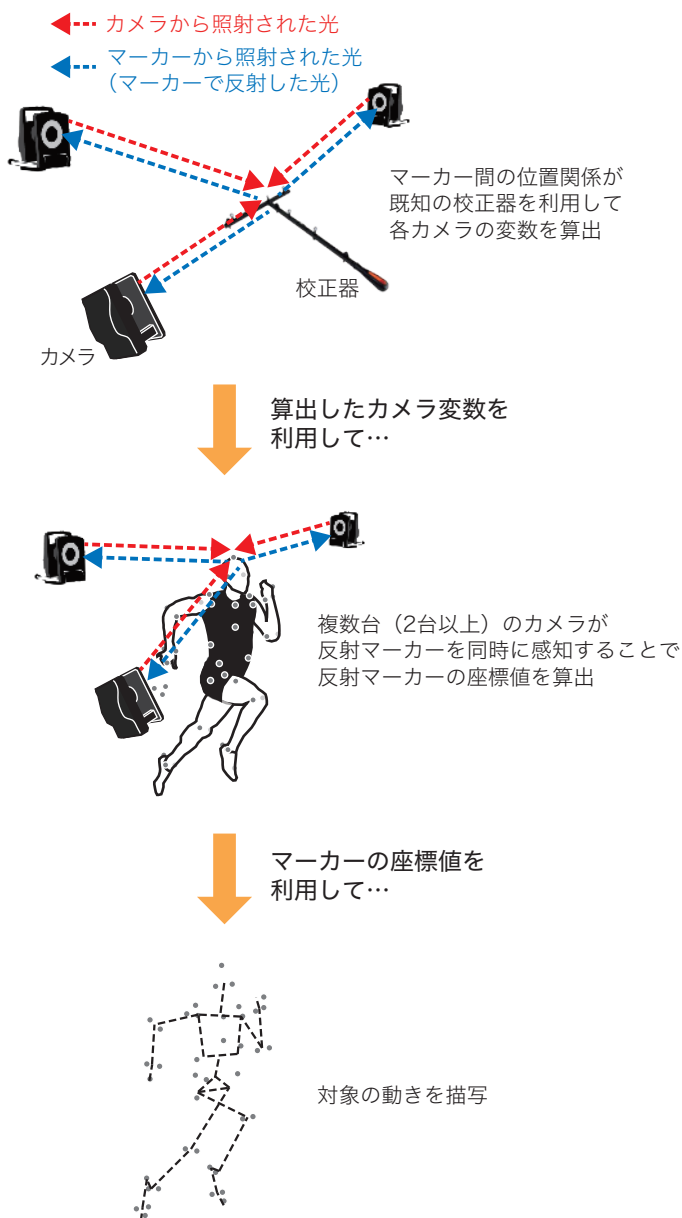


図1 光学式モーションキャプチャーの測定原理の概要

一方、カメラが感知する光が多すぎると、空気中の浮遊物や地面で反射した光をマーカーと誤認識することがあります。したがって、光学式モーションキャプチャーは主に屋内で使用し⁵⁾、屋外で使用する場合には、陽ざしおよび照り返しの強い場所や時間帯を避けるなどの配慮が必要です。

(2) 慣性センサー式モーションキャプチャー

慣性センサー式システムは、一つのセンサーユニット（慣性センサー）内に加速度・ジャイロ・地磁気センサーが搭載されたシステムであり、一般的には、身体各部にセンサーが取り付けられる専用のスーツを装着することによって計測できます（図2）。

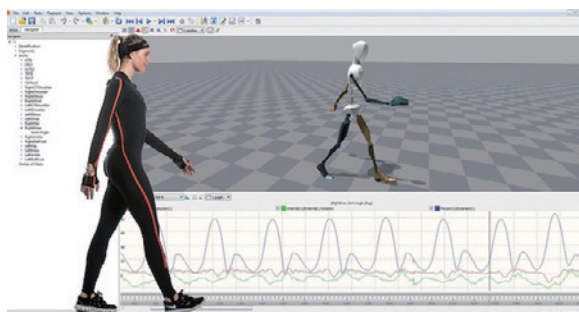


図2 スーツ型の慣性センサー式モーションキャプチャーの例 (XSSENS MVN LINK)

図3は、光学式システムと慣性センサー式システムを同時に用いて、各々のシステムからランニング動作中（分析範囲は約15m）の右上前腸骨棘点の座標値を出力したものです。この際、慣性センサー式では、計測された加速度・角速度・地磁気データを元に座標値を計算（基本的には加速度を二回積分）しています。図3より、両システムの座標値は概ねよく一致していることがわかります。一方、速度にしてみると両システムの差異が生じます（図4）。この時、光学式では、座標値を微分、慣性センサー式では、加速度を積分することによって速度を算出しています。座標値のデータは光学式が基準といえますが、そこから速度と加速度を得ようとすると微分演算に伴う誤差が生じます。一方、慣性センサー式では、加速度と角速度データは計測データとして直接的に収集されるため、演算に伴う誤差を抑えることができます。このため、慣性センサー式は、角速度や加速度が重要な計測に適しているといえるでしょう。慣性センサー式を用いる際の留意点としては、以下のことが挙げられます。

①ランニング計測など動作時間が長い場合には、ドリフト*による誤差にも配慮する。

※ドリフト：長時間計測にともなって徐々に値が真値から外れていく現象

②着地動作や衝撃の加わる動作においては、座標値の算出に誤差が生じやすい。

③先行文献ではランニングや歩行などの2次元動作における座標値の精度は十分検証されているものの、投球時の肩関節の座標値の推定など、3次元動作における位置の推定精度は明らかになっていない。

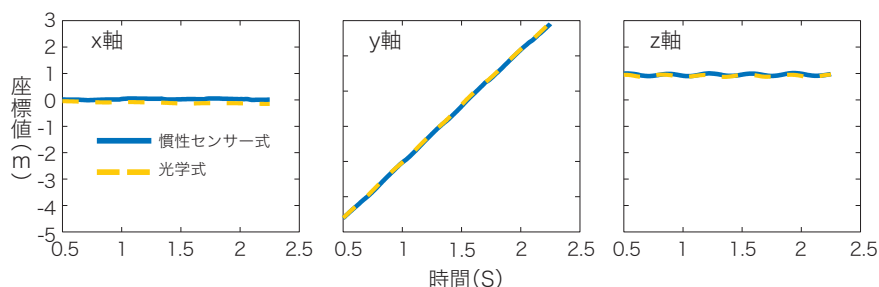


図3 慣性センサー式および光学式モーションキャプチャーを用いたランニング動作中の右上前腸骨棘点の座標値の比較

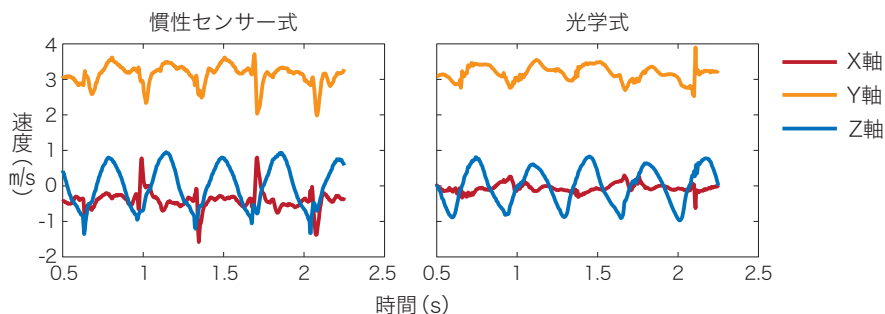


図4 右上前腸骨棘点の速度の比較

(3) 磁気センサー式モーションキャプチャー

磁気センサー式モーションキャプチャーは、磁気発信機（トランスミッター）と受信機（磁気センサー）から構築されるシステムです（図5）。磁気センサーには直交する3軸方向のコイルが搭載されており、このコイルが磁気を感知する仕組みとなっています。ある磁気を与えられた時、磁気センサーの姿勢や位置によってコイルが感知する磁気

の強さに変化が生じます。このことを利用して、センサーの姿勢や位置を計測しています（計測データ）。したがって、磁場が乱れる環境（計測範囲付近に金属がある場合など）は測定に適さない環境といえるでしょう。また、光学式と同様、得られた座標値や方位（姿勢角）を数値微分することによって、速度や加速度、角速度、角加速度を算出することができます。

スポーツ分野の計測で比較的多く用いられているPolhemus社製の磁気センサー式モーションキャプチャーでは、位置の誤差は静止状態で平均0.76mm、動的状態で平均0.71mm、姿勢角の誤差は静止状態で平均0.15度であると報告されています⁶⁾。光学式と比較した研究結果では、ゴルフスイング中の手の角速度の誤差は平均で24deg/sだったことが報告されています⁷⁾。

磁気式モーションキャプチャーの利点は、光学式に比べて安価で、準備に時間がかからず、野外でも計測ができるという点です。一方、トランスミッターから発する磁場には限度（上述したPolhemus社のシステムではトランスミッターの周囲約1m）があるため、計測範囲が限定されてしまう、といった不利点があります。したがって、ゴルフスイングや野球のピッチング動作など、動作範囲が限られた運動の計測に適しているといえるでしょう。



図5 磁気センサー式モーションキャプチャーの例
(Polhemus社製、LIBERTY)

ゴルフにおけるバイオメカニクスデータの活用

選手のパフォーマンス強化プランにPDCA (Plan, Do, Check, Action) サイクルという概念を当てはめた場合、スポーツバイオメカニクスはCに資する分野といえるでしょう。パフォーマンスを客観的に評価することによって、解決すべき課題とその原因となる事柄（改善点）についての的を絞ることができ、効果的な解決策（トレーニングや練習ドリル）が導けるかもしれません。

表は、あるゴルフ選手のスイングを光学式モーションキャプチャーによって分析した結果（パフォーマンス評価シート）の一部を示したものです（コーチが英語圏出身のため英語で記しています）。この選手（右打ち）の場合、骨盤に対して胸郭を右に大きく側屈させた状態でダウンスイングをしていたため、腰椎に負担をかけていることが指摘されていました。分析の結果、クラブや胸郭のスイング面はある傾きをもっているのに対し、骨盤はより地面に水平な面でスイングしていたため（項目10）、右側屈が生じていることが示唆されました。また、骨盤の回転方向を制御する股関節トルク（股関節筋群を主として発揮した張力が関節を動かそうとする‘力’）の方向（項目6, 7）が、上記の骨盤の回転運動の方向に大きく関わっていることが示唆されました。コーチ達との議論を経て、特に右股関節の動作を修正するドリルを選手に提示することになりました。以上は一つの例に過ぎませんが、今後こうした評価→分析→指導のサイクルがより一般的となり、選手のパフォーマンスが効果的に高まればよいなと思っています。

Parameters	Component	Phase	Standard value	2020 Dec.	2019 Dec.	2018 Dec.
1 Hosel speed	[m/s]		45.08 ± 1.78	48.45	46.05	45.77
Energy generated and transferred in the body						
2 STP	[J]	Right hip to the pelvis	51.0 ± 25.3	★ 14.2	6.1	19.60
3	[J]	Left hip to the pelvis	59.9 ± 26.3	73.1	74.2	66.48
4	[J]	torso to thorax	235.1 ± 36.2	231.5	208.4	209.07
5	[J]	shoulder to arm	456.4 ± 82.2	566.5	513.4	502.67
6 JT-angle relative to SP axis	[deg]	Right hip	PSTP 70.1 ± 7.3	★ 78.8	77.6	78.3
7	[deg]	Left hip	PSTP 46.6 ± 12.4	63.8	50.2	62.3
8	[deg]	torso	PSTP 23.1 ± 10.7	★ 13.4	43.5	24.4
9	[deg]	shoulder	PSTP 17.3 ± 5.0	17.9	16.8	24.2
Motion						
Direction of angular velocity						
10 Pelvis	[deg]	relative to SP-axis	Pmax 17 ± 6	★ 24	21	22
11 Thorax	[deg]	relative to SP-axis	Pmax 11 ± 3	9	11	8
12 Upper limb	[deg]	relative to SP-axis	Pmax 24 ± 5	22	21	25
13 Club	[deg]	relative to SP-axis	Pmax 2 ± 2	1	2	1

★: good / ★: not good

AIとバイオメカニクス

■ AIについて

AI (Artificial Intelligence) は、日本語で人工知能と訳されるように、人間のような知性を持った機械であることが期待され、またこのようなAIの出現を心配する著名人もいます⁸⁾。しかし、人間のような知性を持った「汎用型AI」と呼べるAIはまだこの世になく、その研究成果も人間の知能に遠く及んでいないのが現状です。それに対し、ある特定の役割に特化した「特化型AI」は、これまでに多くの技術が実用化されています。

特化型AIは、コンピュータの性能の向上、インターネットの普及、機械学習と呼ばれる手法の発展などによって急速に進化しています。2015年にトップ棋士を破って話題になった囲碁AI、アルファ碁やiPhoneなどに搭載されているSiriのような音声アシストAIは、機械学習を用いた特化型AIとして有名です。機械学習では、あらかじめ人間が、画像などのデータと正解ラベル（データの意味、名前など）をペアにした大量のデータセット（教師データ）を用意する必要があります。次に、この教師データを使って、データと正解ラベルをAIに繰り返し学習させ、データと正解ラベルにあるなんらかのパターンを見つけさせる作業を行います。適度にパターンを学習したAIは、初めて認識するデータであっても、その名前などを当てることができるようになります。



■ トラッキング AI

スポーツバイオメカニクス分野においてもAIの利用が進んでいます。野球やテニスでは、動画に映るボールをトラッキングするAIが既に活用されています。国立スポーツ科学センターでも、卓球のゲーム分析支援AI⁹⁾を日本IBMと共同開発し、日本卓球協会がすでに現場で活用しています(図1)。このAIには、試合に映る選手をトラッ



図1 卓球用ゲーム分析支援AI

選手のトラッキングによるラリーシーンの特定と、映像に映る得点板の数字の認識にAIが使われている。

キングすることで、ラリー以外の不要なシーンを表示させない機能があります。また、画像に映る得点板の数字を読み取るAIによって得点の推移を確認できます。このようなAIによって、現場でのデータ処理にかかる労力は格段に小さくなっています。

■骨格推定AI

トラッキングAIの他に特筆すべき技術として、皮膚や服の上にマーカーを貼ることなく人の骨や関節の位置を推定する骨格推定AIがあります。骨格推定AIは、2014年にDeepPoseと呼ばれる手法が考案されて以降、その性能は飛躍的に向上してきており、最新の技術では、複数の人物の骨格を3次元でリアルタイムに推定するようなものも登場しました¹⁰⁾ (図2)。

近年、スポーツバイオメカニクス分野でも骨格推定AIを用いた動作分析システムがいくつか登場しました。スポーツバイオメカニクスで一般的に使われる光学式モーションキャプチャーでは、身体に貼付した反射マーカーから関節中心を推定し、選手の骨格をモデル化します (Chapter5 参照)。一方で、骨格推定AIを用いたシステムでは、反射マーカーを貼付する必要がないので、マーカーレスモーションキャプチャーと呼ばれています。しかし、現在のところ、これらの手法をそのままスポーツバイオメカニクス分野で活用するには注意が必要です。その理由は教師データの質にあります。先行研究によりますと、骨格推定AIが教師データとして利用しているものは、Youtubeなどインターネット上に公開されている様々な人の映像に、アマゾンなどのサービスを介して雇われたパートタイムの作業者が、見た目で関節の位置にマークすることで作成されたものがほとんどです。そのため、関節中心位置をミリ単位の精度で求める必要がある動作分析で利用すると、必要な精度での推定ができない可能性があります。ただし、トレーニング中に行ったエクササイズの種類やストローク数の算出、歩幅の算出など、関節中心位置を厳密に求めなくてもよい場合には大いに役立つでしょう。今後はこれらの製品で使われているモデルや教師データをよく調べ、その精度を既存の手法と比較したうえで、適切な範囲で利用する必要があるでしょう。マーカーレスモーションキャプチャーが光学式のシステムと同様に使えるようになると、格闘技やブレیکنなど、反射マーカーを使った計測が難しかった競技での動作分析が容易になるかもしれません。



図2 スポーツにおける3次元複数人物の骨格推定
(Moonら¹¹⁾の図の一部を転載)

【参考文献】

Chapter2 測定値に含まれる誤差

- 1) 江崎貴裕. 分析者のためのデータ解釈学入門 : データの本質をとらえる技術. ソシム, 30-33, 2020.
- 2) Muñoz-López A, Granero-Gil P, Pino-Ortega J, De Hoyo M. The validity and reliability of a 5-hz GPS device for quantifying athletes' sprints and movement demands specific to team sports. J Hum Sport Exerc, 12(1) : 156-166, 2017.
- 3) インターリハ株式会社. VICON精度試験結果. <http://www.vicon.jp/accuracy/> (2021年12月)
- 4) アクイティ株式会社. OptiTrackの品質 : ノウハウ - アクイティ (2017年11月). <https://www.acuity-inc.co.jp/pickups/knowhow/docs/20171122/> (2021年12月)
- 5) 株式会社ナックイメージテクノロジ. モーションキャプチャー MAC3D System. <https://www.nacinc.jp/analysis/motion-capture/mac3d-system/> (2021年12月)
- 6) Nakano N, Sakura T, Ueda K, Omura L, Kimura A, Iino Y, Fukushima S, Yoshioka S. Evaluation of 3D markerless motion capture accuracy using OpenPose with multiple video cameras. Front Sports Act Living, 2: 50. 2020.

Chapter3 GPS(グローバルポジショニングシステム)

- 1) 国土地理院. <https://www.gsi.go.jp/common/000197676.pdf> (2022年1月11日)
- 2) Malone LL, Lovell R, Varley MC, Coutts AJ. Unpacking the Black Box: Applications and Considerations for Using GPS Devices in Sport. Int J Sports Physiol Perform, 12: S2-18-26, 2017.
- 3) Scott MTU, Scott TJ, Kelly VG. The validity and reliability of global positioning systems in team sport: A brief review. J Strength Cond Res, 30 (5): 1470-1490, 2016.
- 4) Townshend AD, Worringham CJ, Stewart IB. Assessment of speed and position during human locomotion using nondifferential GPS. Med Sci Sports Exerc, 40(1): 124-132, 2008.
- 5) Vickery WM, Dascombe BJ, Baker JD, Higham DG, Spratford WA, Duffield R. Accuracy and reliability of GPS devices for measurement of sports-specific movement patterns related to cricket, tennis, and field-based team sports. J Strength Cond Res, 28: 1697-1705, 2014.
- 6) Varley MC, Fairweather IH, Aughey RJ. Validity and reliability of GPS for measuring instantaneous velocity during acceleration, deceleration, and constant motion. J Sports Sci, 30: 121-127, 2012.
- 7) Kelly SJ, Murphy AJ, Watsford ML, Austin D, Rennie M. Reliability and validity of sports accelerometers during static and dynamic testing. International Journal of Sports Physiology and Performance, 10(1): 106-111, 2015.
- 8) Gastin PB, McLean O, Spittle M, Breed RVP. Quantification of tackling demands in professional Australian football using integrated wearable athlete tracking technology. Journal of Science and Medicine in Sport, 16(6): 589-593, 2013.
- 9) 山本隼年, 武村政徳, 橘未都, 辻田純三, 北條達也. GPSを活用したラグビーのゲーム分析. バイオメカニクス研究, 21(1): 25-29, 2017.

Column1

- 10) 横澤俊治, 中村真理子. ポート競技におけるシングルスカルとダブルスカルのバイオメカニクスの相違に関する事例研究. Journal of High Performance Sport, 6: 1-11, 2020.

Column2

- 11) 中村大輔, 中村真理子, 早川直樹. 第31回オリンピック競技大会(2016/リオデジャネイロ)および事前キャンプ中におけるU23サッカー男子日本代表チームを対象としたコンディション評価 ~ External load および Internal load の双方を用いた検討 -. Journal of High Performance Sport, 4: 176-187, 2019.

Chapter4 LPS(ローカルポジショニングシステム)

- 1) van der Kruk E, Reijnen MM. Accuracy of human motion capture systems for sport applications: state-of-the-art review. Eur J Sport Sci, 18 (6): 806-819, 2018.
- 2) Linke D, Link D, Lames M. Football-specific validity of TRACAB's optical video tracking systems. PLoS One, 15 (3): 1-17, 2020.

- 3) Manafifard M, Ebadi H, Abrishami Moghaddam H. A survey on player tracking in soccer videos. *Comput Vis Image Underst*, 159: 19–46, 2017.
- 4) Rico-González M, Los Arcos A, Nakamura FY, Moura FA, Pino-Ortega J. The use of technology and sampling frequency to measure variables of tactical positioning in team sports: a systematic review. *Res Sport Med*, 28 (2): 279–292, 2019.
- 5) Hoppe MW, Baumgart C, Polglaze T, Freiwald J. Validity and reliability of GPS and LPS for measuring distances covered and sprint mechanical properties in team sports. *PLoS One*, 13(2): e0192708, 2018.
- 6) Luteberget LS, Spencer M, Gilgien M. Validity of the Catapult ClearSky T6 Local Positioning System for Team Sports Specific Drills, in Indoor Conditions. *Front Physiol*, 9(115), 2018.
- 7) Fischer-Sonderegger K, Taube W, Rumo M, Tschopp M. How far from the gold standard? Comparing the accuracy of a Local Position Measurement (LPM) system and a 15 Hz GPS to a laser for measuring acceleration and running speed during team sports. *PLoS One*, 16(4): e0250549, 2021.
- 8) Linke D, Link D, Lames M. Validation of electronic performance and tracking systems EPTS under field conditions. *PLoS One*, 13(7): e0199519, 2018.

Column3

- 9) 横澤俊治, 加藤恭章, 紅根英信, 熊川大介. スピードスケート国際競技会の中長距離レースにおける滑走軌跡と速度の分析. *Sports Science in Elite Athlete Support* 3: 27-38, 2018.

Chapter5 モーションキャプチャー

- 1) Eline VDK, Marco MR. Accuracy of human motion capture systems for sport applications; state-of-the-art review. *Eur J Sport Sci*, 18(6): 806-819, 2018.
- 2) アクイティ . ノウハウ. <https://www.acuity-inc.co.jp/pickups/knowhow/> (2022年1月21日)
- 3) Merriax P, Dupuis Y, Boutteau R, Vasseur P, Savatier X. A Study of Vicon System Positioning Performance. *Sensors*, 10(4):1591, 2017.
- 4) Lempereur M, Brochar S, Leboeuf F, Rémy-Nérisabd O. Validity and reliability of 3D marker based scapular motion analysis: A systematic review. *Journal of Biomechanics*, 47(10): 2219-2230, 2014.
- 5) Spörri J, Schiefermüller C, Müller E. Collecting kinematic data on a Ski track with optoelectronic stereophotogrammetry: A methodological study assessing the feasibility of bringing the biomechanics Lab to the field. *PloS One*, 11(8): e0161757, 2016.
- 6) Nafis C, Jensen V, Beauregard L, Anderson P. Method for estimating dynamic EM tracking accuracy of surgical navigation tools. Paper presented at the Medical Imaging 2006 Visualization, Image-Guided Procedures, and Display. CA: San Diego. 2006.
- 7) Tinmark F, Hellstrom J, Halvorsen K, Thorstensson A. Elite golfers' kinematic sequence in full-swing and partial-swing shots. *Sports Biomechanics*, 9: 236–244, 2010.

Column5

- 8) Martin F著, 松尾 豊 監修, 水原 文 訳. 人工知能のアーキテクトたち ―AIを築き上げた人々が語るその真実. オライリージャパン, 2018.
- 9) Chaudhury S, Kimura D, Vinayavekhin P, Munawar A, Ozaki H, Tachibana R, Kidokoro S. Unsupervised temporal feature aggregation for event detection in unstructured Sports videos. *IEEE International Symposium on Multimedia*. 9-97, 2019.
- 10) Huang YC, Liao IN, Chen CH, Ik TU, Peng WC. TrackNet: A Deep Learning Network for Tracking High-speed and Tiny Objects in Sports Applications. 16th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal-based Surveillance. 1-8, 2019.
- 11) Moon G, Chang JY, Lee KM. Camera distance-aware top-down approach for 3d multi-person pose estimation from a single rgb image. In *Proceedings of the ieee/cvf international conference on computer vision*. 10133-10142, 2019.

【執筆者一覧】（五十音順、所属はいずれも国立スポーツ科学センター）

相原 伸平	{Chapter4}
尾崎 宏樹	{Column5}
景行 崇文	{Chapter5}
河野 由	{Chapter3}
木村 新	{Chapter1、2}
高木 斗希夫	{Chapter5 / Column4}
中島 大貴	{Chapter3}
中村 真理子	{Column2}
山下 大地	{Chapter4}
横澤 俊治	{Chapter1、3 / Column1、3}

【編集】

ハイパフォーマンススポーツセンター／国立スポーツ科学センター

【監修】

横澤 俊治	国立スポーツ科学センター
窪 康之	国立スポーツ科学センター

コーチングのためのバイオメカニクス関連機器の活用ガイドライン —位置とスピードの計測器を中心に—

第 1 版発行：2022 年 3 月 31 日

発 行：独立行政法人日本スポーツ振興センター ハイパフォーマンススポーツセンター
国立スポーツ科学センター (JISS)

〒115-0056 東京都北区西が丘 3 丁目 15 番 1 号

制 作：株式会社デュナミス

〒113-0033 東京都文京区本郷 3-38-14 NEOSビル 6 階

※本冊子の内容の一部あるいは全部を無断で複写複製(コピー)することは、法律で認められた場合を除き、権利侵害となるため著作権者の許諾が必要です。

ハイパフォーマンススポーツセンター／国立スポーツ科学センター

コーチングのための バイオメカニクス関連機器の 活用ガイドライン

ー 位置とスピードの計測器を中心に ー