

8.

スポーツ行動センシング

基
専
応
般—位置と加速度の計測から
エネルギー消費を知る—

仰木 裕嗣 慶應義塾大学政策・メディア研究科

筆者の研究室では、加速度センサやジャイロセンサに代表される慣性センサを用いてスポーツや身体活動の運動計測についての研究を長年行っている。本稿では、それらの中から水中運動におけるエネルギー消費を推定する応用事例を紹介したい。

水中運動のモニタリング

水中歩行時のエネルギー消費推定

近年、スイミングスクールや公共プールでの水中歩行が盛んである。水中歩行は、腰痛や膝痛の成人や高齢者にとって安全で、ほどよい身体負荷を与えることができるために、筆者は大いに普及させたいと考えている。しかしながら、陸上での歩行やジョギングと比較すると、いったいどのくらいのカロリー消費が期待できるのかがよく分かっていないために、運動強度や運動時間の目標設定が曖昧になりがちである。そこで筆者の研究室では加速度センサと無線による位置センサを応用して、水中歩行用の活動量計を開発した²⁾。水中を移動する場合、我々が消費するエネルギーは、移動速度に強く依存することが知られている。これは水から受ける抵抗のうち、身体の前面から流入してくる水の流れによって生じる圧力抵抗が移動速度の2乗に比例することによる ($\text{Force}=0.5C_D \rho SV^2$)。ここで、 C_D は抵抗係数、 ρ は水の密度、 S は前面投影面積、 V は移動速度である。単位時間あたりのエネルギー消費、すなわちパワーはこの抵抗力に速度を乗じるため速度の3乗に比例する ($\text{Power}=0.5C_D \rho SV^3$)。そして、水中

で移動するヒトの消費エネルギーは、この水の抵抗に対して行う仕事が非常に大きいと考えられている。

エネルギー消費計算における位置センサの役割

水中歩行におけるエネルギー消費量を知るには、歩行速度を知ることが必要であることが分かった。ところが加速度センサから得られる加速度信号から直接、移動速度を算出することはできない。このことは、多くの方が誤解しているようで、加速度センサによって観測される加速度には並進加速度項に加えて、重力項、遠心加速度項等も含まれることから、そのまま時間積分しても並進速度は求められない。もしも並進速度を加速度によって知りたければ、常に空間における加速度センサ自身の姿勢とその回転状態を知ることが必要であるためジャイロセンサも必要になる。基本的には、歩数計で得られるデータと同じように、水中歩行においても身体に装着した加速度センサからは、歩行の周期にほぼ一致した身体の上軸、前後軸加速度の周期的波形が得られる。ただし、陸上の歩行に比べれば、その波形自身は動きがゆっくりしていることから緩やかである。加速度信号では並進移動速度が求められないことから、筆者らは、移動体であるヒトの位置を計測することで、その時間微分から速度を求めることを考えた。テキサスインスツルメンツ社は、ロケーションエンジン (Location EngineTM) と呼ぶ技術を実装している。ロケーションエンジンは、無線電波強度 (RSSI) によって移

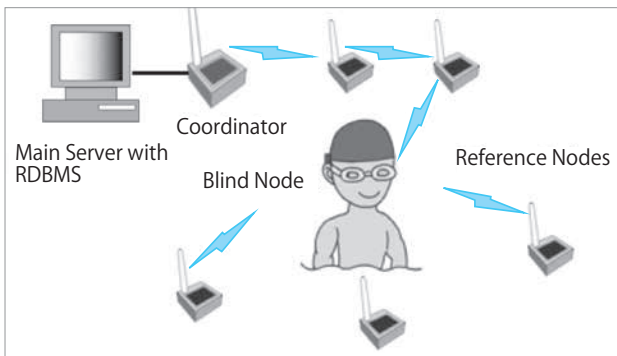


図-1 水中歩行用活動量計の全体イメージ図

動体の位置を捕捉するための技術である。無線には、2.4GHz帯のZigBee (IEEE802.15.4)を利用する。コーディネータは、すべてのZigBeeノードを制御し、リファレンスノード (RN) はあらかじめ空間における位置座標が定まっているノードをさす。このRNからの電波強度および既知の位置座標をブラインドノード (BN) が受け取ることで自身の位置を三角測量の原理で割り出す。リファレンスノードの配置は電波到達域に制限されるが、そのエリアを8bitで量子化する設計になっている。したがって、64m四方の区域であれば、その粒度は25cmとなる。以前は、得られた電波強度からの位置計算は設計者で行わなければならなかったが、CC2431にはこのためのプロトコルスタックが実装されており、ユーザは任意のBNに対してその位置情報を問い合わせるだけで済む。屋内におけるローカルポジショニングシステムであるロケーションエンジンは、屋内プールで行われることが多い水中歩行に最適であると考え採用した。

エネルギー消費計算における加速度センサの役割

位置情報の時間微分から速度を算出することで、水中で移動に要するエネルギー消費分はロケーションエンジンによる計測が担うことになる。ところが、ヒトの運動では「自分自身の関節」を動かすためにもエネルギーを消費する。その場で駆け足をしてもエネルギーを消費することで理解していただければ。この部分を厳密に計測することは生理学実

験でも簡単にはいかない。そこで筆者らは加速度センサによって得られる信号強度が「運動の激しさ」に相当すると仮定して、加速度センサを利用することにした。最後に生存するための最低限のエネルギーである安静時代謝エネルギーが加わって全体のエネルギー消費が構成される。安静時代謝量は、性別・年齢・体重によってほぼ決定されることがすでに生理学の知見で分かっている¹⁾。全エネルギー消費 = (安静時エネルギー消費) + (身体自身を動かすためのエネルギー消費) + (水の抵抗に対するエネルギー消費)、としてモデル化し、これに必要な移動速度 (位置より推定)、身体加速度をリアルタイム計測し、ユーザのエネルギー消費量を知らせる水中歩行用活動量計ができあがる。リアルタイムでフィードバックされる消費したエネルギー (J) は、カロリー換算され (kcal)、これはセンサデバイスに内蔵された骨伝導スピーカによってユーザの「頭」に呼びかけられる。骨伝導スピーカ搭載ゴーグルも筆者の既出特許である。図-1は全体のイメージ図である。

水中歩行用エネルギー消費量計

基礎実験

ZigBeeによる位置捕捉を利用するために、必然的にセンサ部は水中ではなく、水上になければならない。そこで、筆者らは同時計測する加速度も水上に出ている部位で計測することを考え歩行者のゴーグルのベルトに相当する後頭部で計測することにし、基礎実験を行った。ここでいう基礎実験とは、実際に成人男女にプールで水中歩行をしてもらい、運動中の呼気ガスからエネルギー消費量を実測することを意味している。実験前には安静時代謝エネルギーも同時に測ることにした (図-2)。

すると、頭部形状と髪型によって、あるいは頭の傾きによっては、頭部の長軸に沿う加速度は人によってさまざまであることが分かった (図-3)。

移動速度と頭部傾斜を考慮した補正加速度、これに個人の性別・年齢・体重・身長 (水深に関係する)



図-2 水中歩行基礎実験

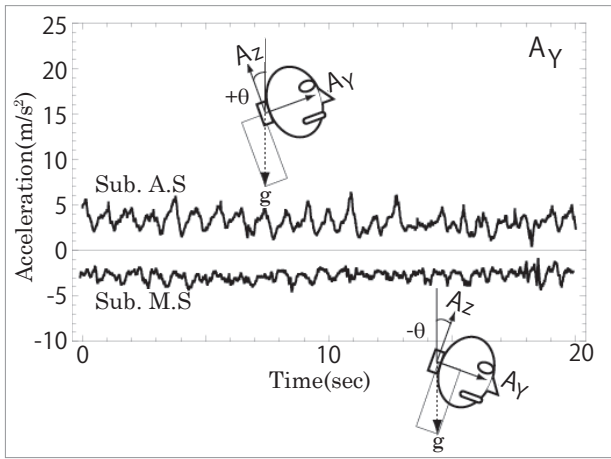


図-3 頭部傾斜による加速度の違い

を入力変数として、基礎実験で構築した推定式によって求められた水中歩行時のエネルギー消費量の推定精度は男女ともに決定係数 $r^2=0.73$ と、商用歩数計の精度と遜色ないレベルであった (図-4)。

ハードウェア

図-5 に完成したハードウェアのプロトタイプを示す。ゴーグルバンドに加速度センサ・ZigBee チップに加えて、CPU・アンテナ・電池が実装されている。ゴーグル脇に円形の骨伝導スピーカを配置して、ユーザのこめかみに接触するようになっている。まだまだ装置自身も大きく、改善の余地はあるが、目標としていた機能はすべて実装することができたと言える。市民プールやスイミングクラブなどの環境で、実際にこのデバイスを装着できるようになるには、危険性がないことを実証しなければならないため、すぐにはいかないが、ゆっくりとした運動を楽しみたい人が行う水中歩行であればその障壁は低いのではないかと考えている。ロケーション

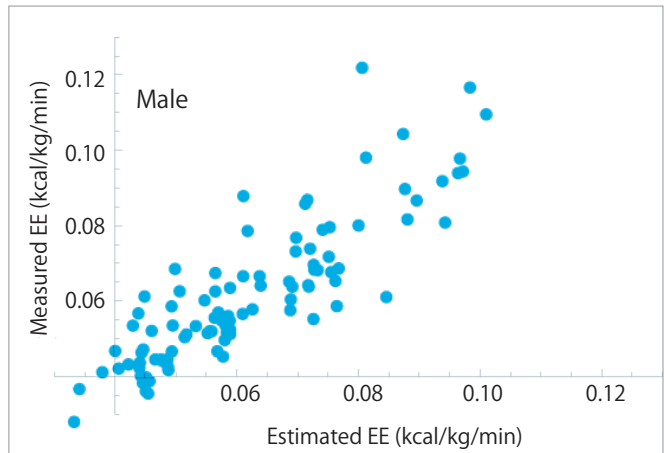


図-4 エネルギー消費量の実測値 (縦軸) と推定値 (横軸) の比較

エンジンの紹介で述べたように、RN はあらかじめ既知の空間座標でなければならない。また RN と BN との高さには差がないことが前提であるために、実際のプール環境にあわせた設計が望まれる。また三角測量が基本原理であるため、BN が複数の RN に囲まれる場合には精度が高いが、RN 同士の線分上に BN が位置してしまうと精度が悪くなる欠点を持っている。図-6 を例にすると被験者がプールサイドに近づく位置精度が悪くなる。多数の RN の配置は BN 側で計算に利用する RN を決定することに時間を要するために、一長一短であることも分かっている。

ソフトウェア

図-7 はプロトタイプを用いた実験中のソフトウェア画面を示している。ユーザの位置がおよその進行方向に向いた矢印で示されている。裏ではデータ蓄積のために、RDBMS の PostgreSQL が動いており、あらかじめ定められた距離や消費カロリーに到達したら、サーバ側からメッセージ ID が送られ、骨伝導スピーカアンプの前段にあたる音声 IC から、「200m 歩きました」、「160 キロカロリー消費しました」、といったメッセージが本人の頭にあたかも天から降ってきた言葉のように届く。これは何とも不思議な感覚で筆者自身面白いと感じている。

市民プールやスイミングクラブは、ほぼ屋内が主流だが、日本ではプール内溺死者は年間 10 名未満

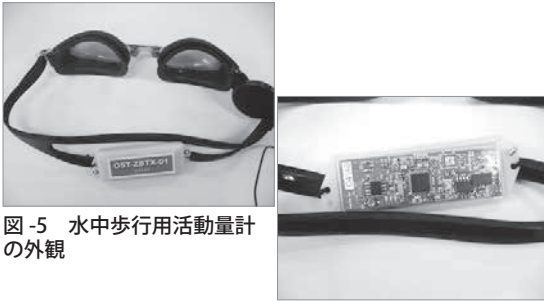


図-5 水中歩行用活動量計の外観

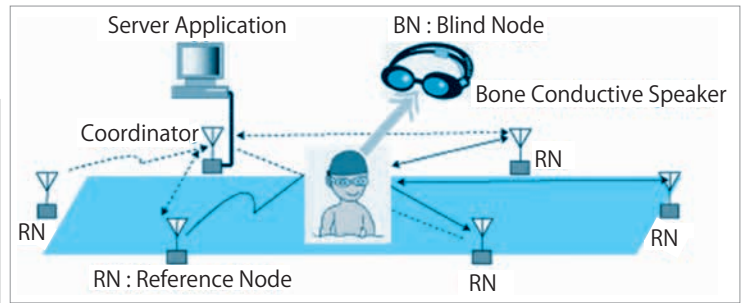


図-6 Coordinator/RN/BN とサーバ

(警察庁資料より) と少ないものの、プールの多い米国などでは比率は著しく高いことも知られている。この装置はこうした環境での文字通りの死活監視にも用いることが可能である。水中歩行を前提にして来場している高齢者に装着してもらい、プール内にいたはずなのに電波不達が続いたら溺れた可能性を知らせるためにアラートを出す、といった用途も考えられる。

今後の展望

筆者らのとった研究の流れは、目的とする情報などの物理量によって推測可能かどうかを検討した上でセンサを決定し、今回は加速度と位置という2つの運動学量からエネルギー消費量を求めた。また推定しなければならない生理学的指標であるエネルギー消費量そのものも未知であったため、その計測から出発して中高年を中心に50名にのぼる被験者による大規模な実験を行った。計測装置の設計やアルゴリズムの開発よりも、実際にはヒトを相手にした実験コーディネートが大変であったが、これをおろそかにすることはできない。筆者の研究室はスポーツやヒトの健康をドメインとした、センサテクノロジーの応用を掲げているが、ヒトを相手にしていることを常に忘れずに研究方針を決めている。現在は、後ろ歩き、カニ歩き、大股歩き、といったさまざまな歩き方が可能な水中歩行の特性も考慮し、これらの歩き方の違いを機械学習によって判別することに取り組んでいる。また、この研究を発展させて水泳トレーニング用のデバイス開発も同時に進めている。これは競泳トレーニング用のツールとして利用する

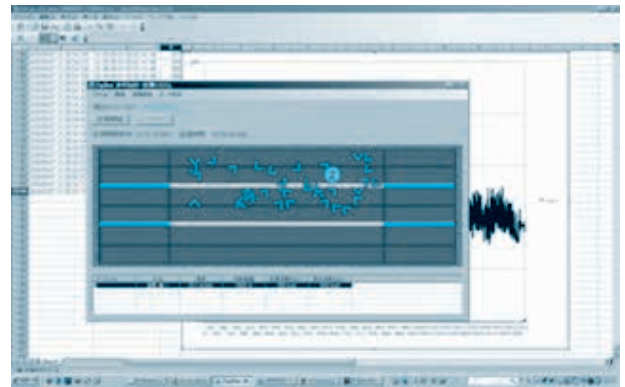


図-7 実験中の被験者の移動軌跡

もので未来の競泳選手向けに開発を進めているものである。

筆者らは今回、計測に用いた無線電波を位置計測の手段として、かつ計測データ・メッセージの送受信の手段として用いたが、これは無線の新しい活用法だと考えている。スポーツ用具はヒトが運動時に身にまとうものであるため、その身体性を損なわないように小型軽量化がますます進むと考えている。それには無線の役割がますます重要になると予想している。

参考文献

- 1) Weir, J. B. : New Methods for Calculating Metabolic Rate with Special Reference to Protein Metabolism, J. Physiol., Aug ; 109 (1-2) : 1-9 (1949).
- 2) Ohgi, Y., et al. : Wireless Activity Monitoring System for Water Walking, Proc. of Biomechanics and Medicine in Swimming XI, pp.130-131 (2010).

(2013年2月26日受付)

仰木裕詞 | ohgi@sfc.keio.ac.jp

博士(政策・メディア)。慶應義塾大学SFC研究所スポーツ・ダイナミクス・インフォマティクス・ラボ代表。慶應義塾大学体育会水泳部競泳技術顧問。日本水泳連盟科学委員。グリフィス大学工学部無線計測応用研究所客員准教授。専門はスポーツ工学、バイオメカニクス。