

加速度情報のフィードバックを用いた 水泳のトレーニング法の研究

大阪大学 笠井 健

(共同研究者) 同 生田 香明

同 若吉 浩二

A New Method for Training Swimmers Using Acceleration Feedback

by

Takeshi Kasai, Komei Ikuta, Kohji Wakayoshi
Faculty of Health and Sport Sciences, Osaka University

ABSTRACT

Measurement of instantaneous velocity of swimmers or runners is essential for the player to understand the relation between his motion and the resultant performance.

Feeding back in real time helpful information extracted from velocity data would enable us to develop new methods of training or new skills of play.

This report describes how to measure the movement of the object optically and how to feedback information to the player. Using a polygon mirror, an optical beam is scanned in the measurement field with a frequency of 360 Hz.

The player wears a cap on which a special optical reflecting sheet is stuck, which reflects light back exactly to the light source when the beam passes the object in each scan.

Determination of the time of reflection as exactly as possible has been done to calculate the instantaneous position of the object, using

a correlation method and an interpolation technique.

In the air, measurement noises were proved to be 0.09 mm and 0.56 mm with the measurement distances of 10 m and 20 m, respectively.

Under still water the comparable accuracy to the one in the air was obtained. Under bubbling whitish water measurement accuracy deteriorated with the increase of depth, but accuracy of 0.9 mm for 10 cm depth and 10 m of measurement distance was obtained.

要 旨

水泳や短距離走の瞬時速度を計測することは泳(または走)の動作の加減速の因果関係を知るために非常に大切である。瞬時速度データから最大加速度あるいは減速度等の情報を実時間で抽出してプレーヤーに伝達すれば、プレーと結果的なパフォーマンスの因果関係をプレー中に理解させることができ、新しいトレーニング法や技能の開発が可能となる。

本研究ではこの目的で光学的方法を用いて遠隔点からプレーヤーの動きを実時間で計測できるシステムを開発した。プレーヤーには光再帰性のきわめて強い反射シートを頭部または身体の一部に貼付する。光スキャナーを用いて毎秒360回測定空間内で光ビームを走査し、反射シートからの光再帰時刻を正確に計測して対象の動きを知る。空気中では測定距離10 m, 20 mに対してそれぞれ0.09 mm, 0.56 mmの測定雑音で計測できることがわかった。静水中の対象物に対しては空気中と同精度、動水中では水深10 cmの物体に対して測定距離10 mの場合0.9 mmの精度で計測できた。

1. ま え が き

水泳や短距離走の瞬時速度を計測することは泳(または走)の動作と加減速の因果関係を知るために非常に大切なことである^{1,2)}。

プレーヤーの瞬時速度のデータから毎ストロー

クにおける最大加速度をはじめ有用な情報を実時間で抽出して、プレーヤーに伝達すれば、自分のプレーとその結果達成されたパフォーマンスの因果関係をプレー中に理解させることができ、新しい技能の開発やトレーニング法の工夫の道がひらける可能性が期待できる。

本研究はこのような目的に供し得る速度の計測システムおよびプレーヤーへの情報のフィードバックシステムの開発とこれを用いた有効なトレーニング法の研究をねらいとしている。

本報告では開発された計測システムとその応用の可能性について述べる。

2. 計測システム

2.1 概 要

従来、速度の計測にはビデオやシネフィルム分析、超音波ドプラー計測、泳者に軽量ワイヤーを引っ張らせ、リールの回転速度を測る方法などが試みられている^{3,4)}。しかし、広いプールやトラックを画角内に包含しようとするビデオの位置分解能が低くなる、プレーヤーに装置やワイヤーを装着することは望ましくないなど種々問題点がある。

そこで図1のように、測定対象の運動体に光再帰性の強い反射シートを貼付し、遠距離から、ポリゴン・スキャナーを用いて投射した光ビームの反射光が光源に隣接して置かれた光検出器に再帰する時刻を計測して対象の偏位、速度を知るとい

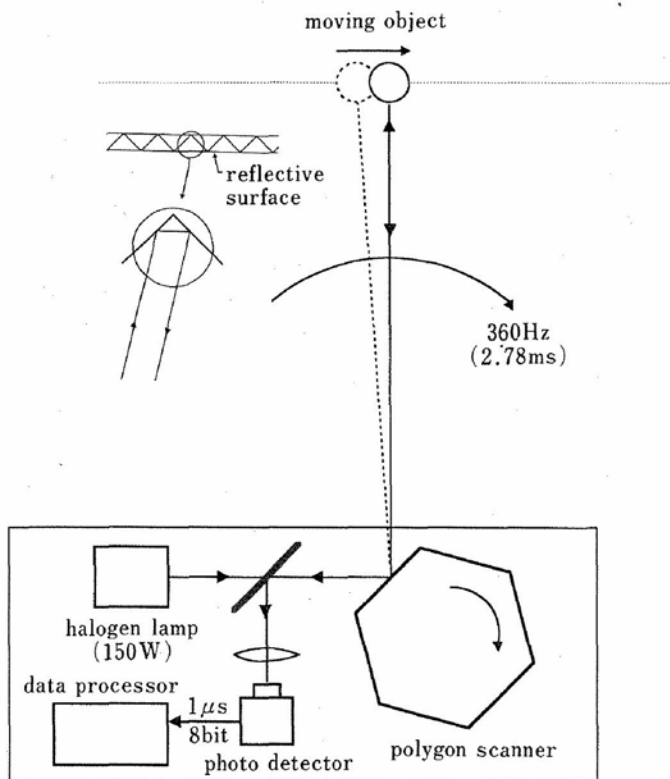


図1 遠隔計測システムの構成

う方法を開発した。

この方法は図2のように直線または曲線上を運動体が移動するとき、そのコース上に置いた基準物体（静止物体）から運動体までのビームのスキャン角 θ とコースに沿った距離 $X(\theta)$ の関係を予め知ることが出来る場合に適用可能である。

2.2 反射体

反射体は厚さ0.2 mmのシート状で非常にフレキシブルである。表面に直径0.1 mmのマイクロキューブが埋めこまれており、反射光は入射光と同じ方向に高い効率で戻るといった性質をもっている。しかし、入射角が大きくなると反射光強度の低下は避けられない。図3(a)は反射体表面へ垂直入射（入射角 0° ）した時の反射光強度を100%として、種々の入射角に対する反射光強度を示したものである。入射角が 45° のとき約25%に低下するので、運動中に反射体の面が光ビームに対して極端に傾斜した場合には計測できなくなる場合が生じる。

反射光強度は光源から反射体までの距離の増大

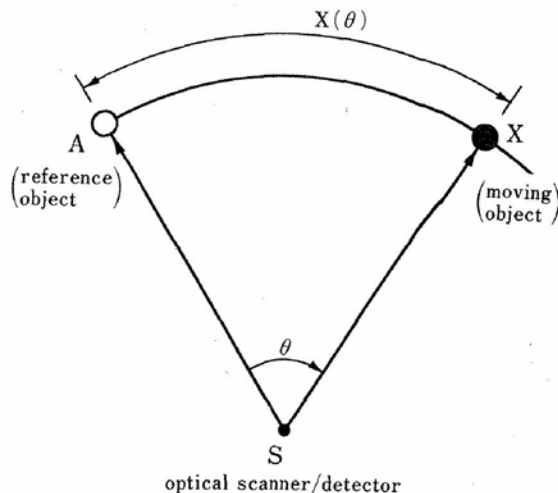


図2 一次元運動計測法

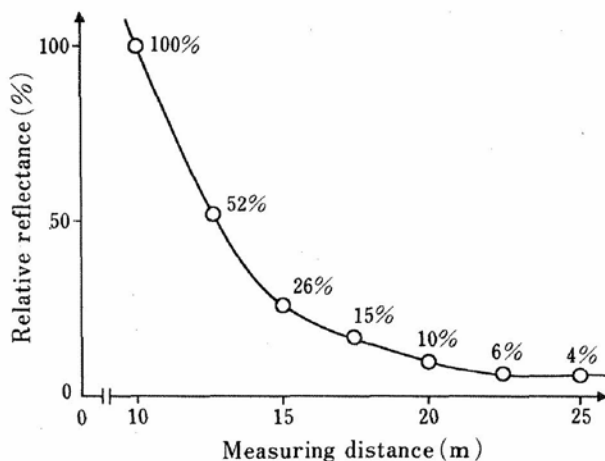
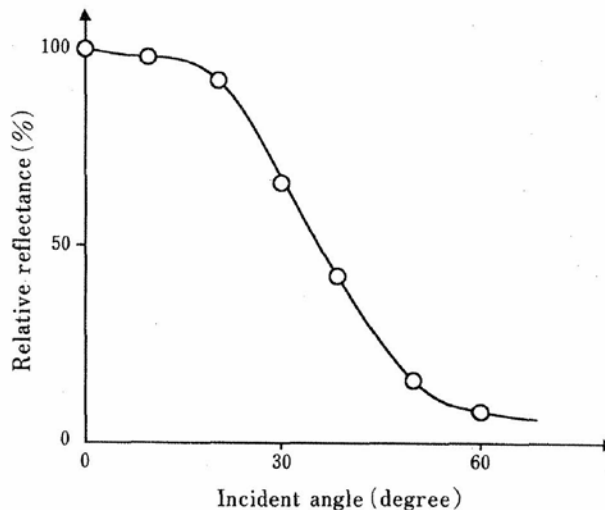


図3 反射材の特性
(a) 入射角と反射強度
(b) 距離と反射強度

とともに減少する。図3 (b) は距離 10 m の場合を 100% として、更に遠い距離における反射光強度を示したものである。反射光強度は凡そ距離の 3 乗に逆比例して減少する。

2.3 ビームスキャナ・光検出器・データ処理装置

150 W のハロゲンランプを光源として平行光を作り 6 角形のポリゴン・ミラーにより測定空間内を 360 回/秒 (周期 2.78 msec) でスキャンする。ビームのスキャン角は約 60° であるから測定空間の大きさは距離 10 m で横幅約 10 m, 距離 20 m で横幅が約 20 m の扇型 (角度 60°) である。

反射体からの再帰光はビームスプリッタにより入射光と分離されフォト・ディテクタにより検出される。この信号は増幅後 $1\mu\text{sec}$ 間隔で A/D 変換 (8 bit) され、32 bit パーソナルコンピュータ PC 9801 RA により実時間処理される。

処理の内容は①運動体の反射光を検出し、その生起時刻をできるだけ正確に決定すること、②この時刻とビームの走査角速度のデータから対象運動体の位置変化を求めることである。光再帰時刻決定のために、ある時刻における反射光の信号波形をテンプレート (型紙) として記憶し、それ以後の光検出器出力信号の中からテンプレートと同じ形の波形を探すという方法を用いた^{5,6)}。出力信号波形がテンプレート波形に一致する時刻は両波形間の相関値が最大となる時刻によって決定した。光検出器の出力信号は $1\mu\text{sec}$ 間隔でサンプルされ、A/D 変換されているので相関値の計算も $1\mu\text{sec}$ 間隔で行われる。したがって、最大の相関値に対応する時刻も $1\mu\text{sec}$ の時間分解能で決定される。

光源から 10 m の距離では $1\mu\text{sec}$ の時間内に光ビームは約 7.5 mm, 20 m の距離では約 15 mm 移動する。したがって、運動体の位置計測の空間分解能はこれらの値で制限され、十分な測定精度が得られない。

そこで、最大相関値とその前後 $2\mu\text{sec}$ における相関値の計 5 点を最もよく近似する 4 次多項式を用いて相関値の真の最大値の生起時刻を推定した。この補間の操作により相関値の真のピークの生じる時刻を約 10 nsec の時間分解能で決定できる。位置精度に換算すると 0.075 mm (距離 10 m), 0.15 mm (距離 20 m) である。図4 は以上の操作を図解したものである。図5 は上述の手順のフローを示している。

3. 計測結果

3.1 空気中の対象物体の計測

測定は空気中および水中の対象物体に対して行った。図6 は静止物体 (貼付反射シートのサイズは $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$) の位置、および同物体が振幅約 3.2 mm で振子運動している時の位置を 10 m の距離から計測した結果の一例である。計測は 2.78 m sec 間隔で、実時間処理によって行った。演算時間は 1 m sec 以内である。図6 より測定的位置分解能 (標準偏差, S. D.) は $\pm 0.085\text{ mm}$ である。

表1 は測定距離 10 m ~ 22.5 m の範囲で変えた場合の静止物体の平均位置測定誤差、標準偏差および最大誤差の絶対値を示したものである。10 m および 20 m に対して測定分解能はそれぞれ 0.09 mm および 0.56 mm, 誤差の最大値は 0.18 mm および 1.23 mm である。

距離 22.5 m に対する測定値が他の距離の測定値に比べ著しく精度が低下しているのは、反射光検出器の出力信号の低下により A/D 変換されたデータが 5 ビット以下となったためである。データのビット数の低下に伴う量子化誤差がこの測定方法のひとつの限界を与えていることがわかる。

3.2 水中の対象物体の計測

水泳の場合にはプレーヤーの帽子に反射体を貼付するのが運動に最も支障がないと考えられる。

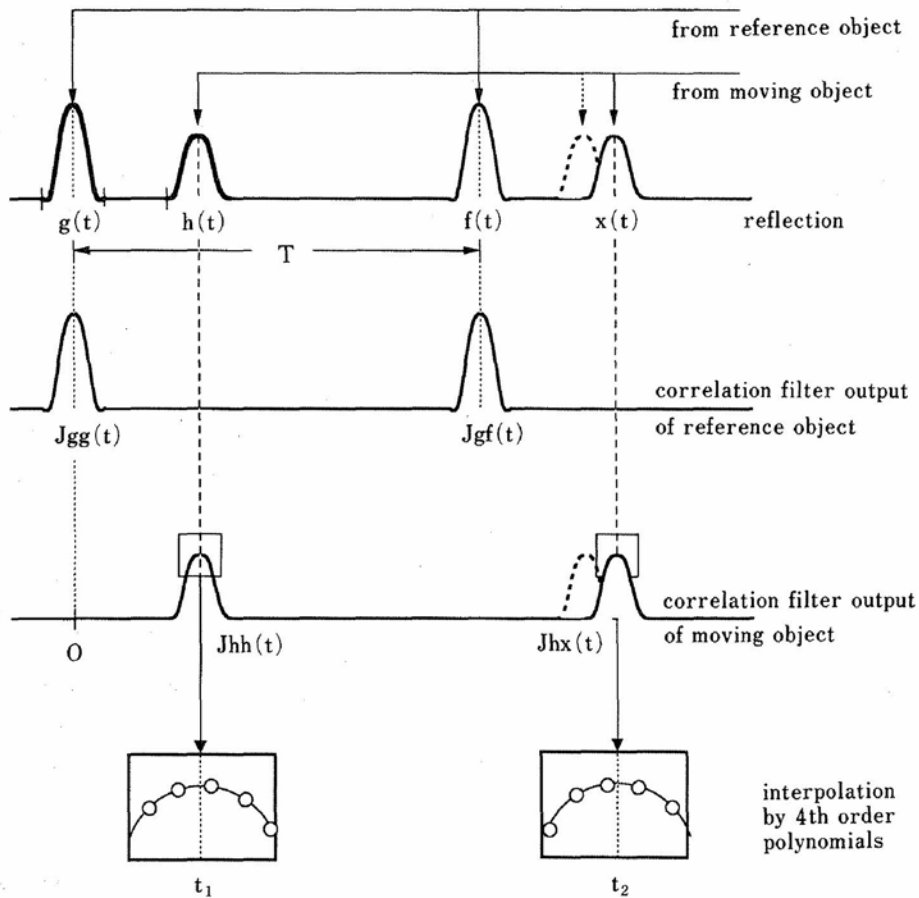


図4 データ処理の手順

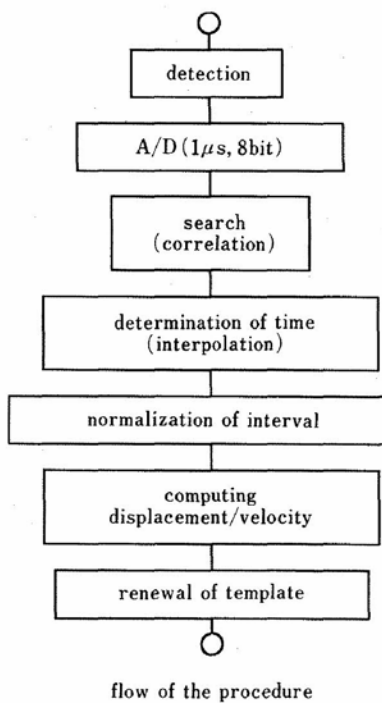


図5 手順の流れ

帽子の部分は1ストローク動作ごとに水没する時間があるため、この測定方法が水没時にも適用可能かどうかを確かめる必要がある。

表2の静水の中に静止物体を沈めた場合と物体の上の水を攪拌して泡立たせた場合の平均位置誤差、標準偏差および最大誤差の絶対値を示したものである。静水の場合には水深に依存せず空気中(水深0 cm)と同じ値を示している。一方攪拌水中では水深の増加に伴い測定分解能、誤差の最大値が増加している。これは水泡の光吸収のため反射光強度が減弱したことによるものである。このデータから水中での運動計測は白濁するほど水泡が生じない限り空気中と大差なく行えることがわかる。また水面で起こるビームの鏡面反射光が計測の妨げになることは全くないことが確かめられた。

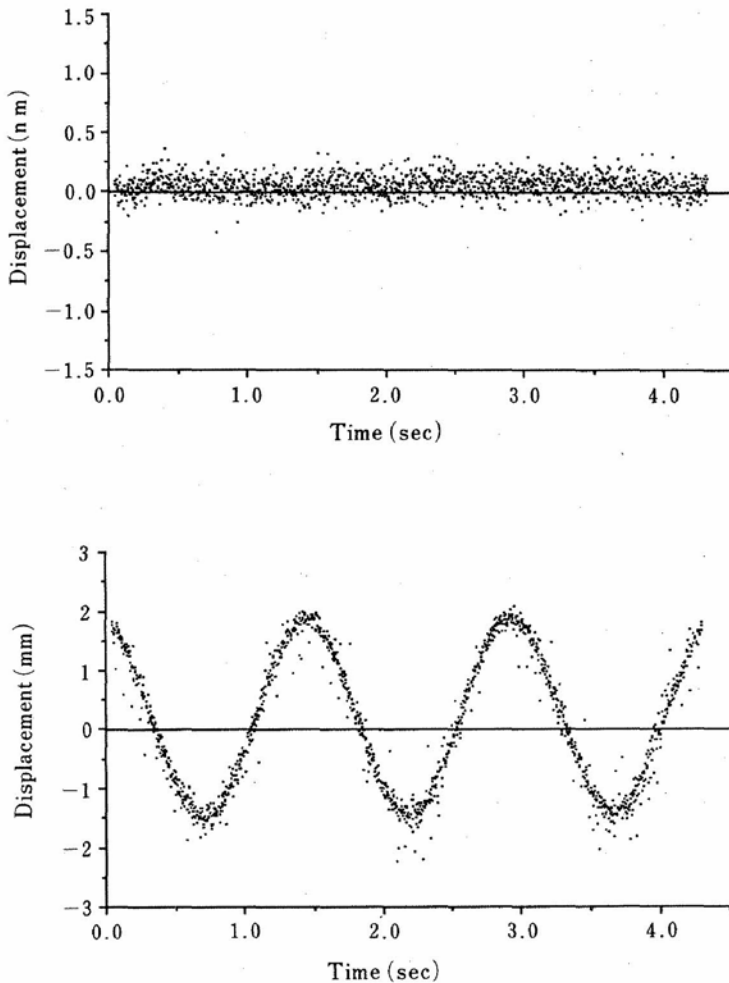


図6 測定データの例 (距離 10 m)
 上: 静止物体の測定ノイズ
 下: 振子運動 (振幅 3.2 mm) 測定例

表1 Measurement Accuracy

measuring distance (m)	no. of data	position error (mm)	S. D. (mm)	error _{max} (mm)
10	15	0.0026	0.086	0.177
12.5	15	-0.0032	0.101	0.199
15	15	0.019	0.198	0.335
17.5	15	-0.059	0.444	1.007
20	15	-0.041	0.556	1.232
22.5	15	-0.187	1.112	2.206

4. 水泳トレーニングへの応用

図7は本計測システムを用いて水泳のトレーニ

表2 Under bubbled water LX=10m

depth (cm)	no. of data	position error (mm)	S. D. (mm)	error _{max} (mm)
0	25	0.016	0.18	0.29
5	25	0.065	0.68	1.36
10	25	-0.088	0.75	1.47
15	25	0.18	0.94	2.13

Under resting water LX=10m

depth (cm)	no. of data	position error (mm)	S. D. (mm)	error _{max} (mm)
0	15	0.018	0.085	0.17
5	15	0.015	0.076	0.15
10	15	-0.042	0.087	0.33
15	15	-0.027	0.086	0.24

ングを行う実験の概念図である。本計測システムにより得られた速度データから、毎ストロークの最大加速度をはじめ何種類かの有用な情報を抽出し、音声に変換してトランシーバを通じてトレーニング中のプレーヤーの防水レシーバに伝送する。プレーヤーは自分のキックあるいはストローク動作の直後に達成された最大加速度あるいは最高速度を耳で確認することができるので、どのような動作が有効で、どの動作は逆効果をもたらすかという因果関係を明確に理解できる。

図8は以上の手順のブロック線図である。計測システムのデータ出力はパーソナル・コンピュータ PC 9801 RA に転送され、情報抽出が行われる。抽出する情報としては①毎ストロークにおける加速度の最大または最小値、②速度の最大または最小値、③加速度の最大値と最小値の差、④あるストローク数内の平均速度等が考えられる。練習の内容によってどのような情報が最も有用であるかが決まると思われるが、実際にどのような状況下でどんな情報が有用となるかは実験を通じて

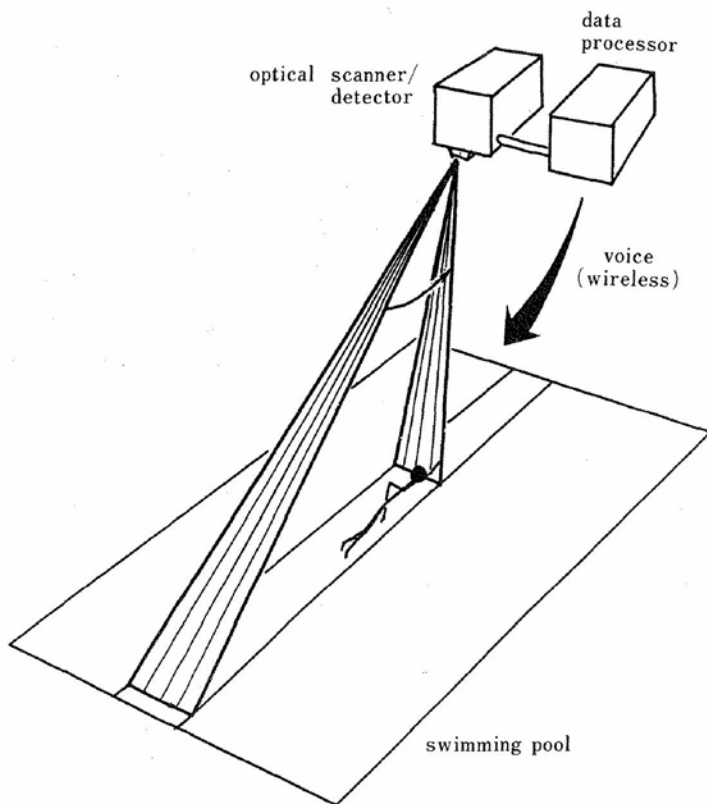


図7 水泳トレーニングへの応用の概念図

確かめることが必要で、現在準備中の課題である。

抽出された情報をプレーヤーに伝える方法としては、①速度、加速度変化等を音の高低または強弱に変換して伝える（アナログ方式）、②情報を数値化して音声に変換して伝える（デジタル方式）の2つが考えられる。両者の方法を実験的に比較し、フィードバック情報の理解のしやすさを検討した結果、デジタル方式の方が圧倒的に理解しやすいという結果が得られたので音声により数値データを伝える方式を採用した。

音声に変換するソフトは5万語の辞書を持ち、入力された単語の音声情報を10 m sec以内に音声合成装置に出力できる。音声合成装置の出力信号をトランシーバ(500 mw)のマイク入力に接続することにより防水レシーバ(ソニー RCB-22)に音声情報を伝達できる。防水レシーバはトランシーバから距離50 m、水深1.5 mの地点で明瞭

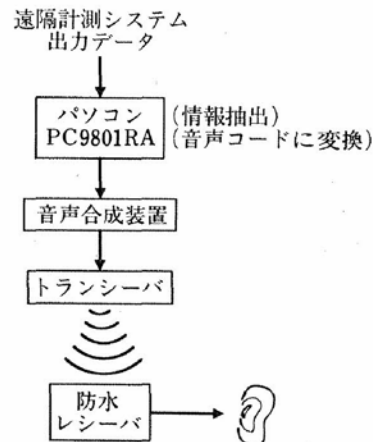


図8 バイオフィードバックの手順

に受信できることが確認された。

5. むすび

強光再帰性反射シートと光ビーム・スキャナーを用いて運動体の移動速度を実時間に遠隔計測するシステムを作成した。またこれを用いて水泳のトレーニングを行うための基礎的検討を行った。

以下に本研究で明確にされた事柄をまとめて記す。

1. 空気中の移動物体の位置を本計測システムを用いて遠隔計測した結果、10 m および 20 m の距離に対して、それぞれ 0.09 mm, 0.56 mm の測定雑音で測れることがわかった。

2. 静水中の物体に対しては水深に関係なく空気中と同じ精度で計測できる。水泡を伴う攪拌水中では測定精度が水深と共に劣化するが水深 15 cm, 距離 10 m の物体を 0.9 mm の精度で計れることが確かめられた。

3. トレーニングへの応用を目的として運動情報をプレーヤーにバイオフィードバックする場合アナログ方式よりデジタル方式の方が情報を理解しやすいことが確かめられた。以上の成果をもとにこのシステムを水泳のトレーニングに応用するためのソフトウェアを現在作成中である。

文 献

- 1) K. Reischle, G. Gaisser, B. Vollers ; A kinematic analysis of intra-cycle speed fluctuations and movement patterns in swimming using chronocyclo graphic LED drivers, *International Series on Biomechanics*, Vol. 3-B, 460-464 (1981)
- 2) S. Kornecki, T. Bober ; Extreme velocities of a swimming cycle as a technique criterion, *Swimming Medicine IV*, University Park Press, Baltimore, 402-407 (1977)
- 3) K. Wakayoshi ; Swimming techniques of Japanese elite swimmers, *New Horizon of Human Movement* (Preprint of Seoul Olympic Scientific Congress) Abstract III, 319 (1988)
- 4) A. Craig, D. Pendergast ; Relationship of stroke rate, distance per stroke and velocity in competitive swimming, *Medicine and Science in Sports*, 11, 278-283 (1979)
- 5) 早瀬敏夫, 笠井 健 ; 波形フィルタを用いた運動時 R 波の検出方法, 第 24 回日本 ME 学会大会論文集, 1-17-1 (1985)
- 6) 笠井 健, 早瀬敏夫 ; 相関フィルタによる運動時 QRS 波の検出, 大阪大学健康体育部紀要, Vol. 2, 19-32 (1986)