

超音波を用いた速度計測に関する研究

Research on speed measurement using ultrasonic wave

○郭 福会

○Kaku fukukai

八戸工業高等専門学校

NIT, Hachinohe College.

キーワード：超音波，速度計測，マイコン，XBee

連絡先：〒039-1192 青森県八戸市田面木上野平 16-1
八戸高専 産業システム工学専攻 機械システムデザインコース
tel:0178-27-7271, e-mail:kaku-m@hachinohe-ct.ac.jp

1. はじめに

移動物体の連続的な速度計測は物理教育においてとても重要である。物理実験で速度を測定する装置として、記録タイマや光電スイッチを用いたデジタル式大型ストップウォッチなどが市販されている。また、スマートフォン、タブレットなど用いた速度計測方法もある^{[1] ~ [3]}。

記録タイマは電源周波数を利用して紙テープに打点を打つ装置で、速度、加速度の測定や運動の法則などの実験によく用いられる。紙テープから速度を求める作業は、生徒が速度や加速度の概念を理解するために重要であるが、打点の読み取りに時間を要するので複数の実験を1回の講義で行うのは難しい。そして、記録タイマを利用した速度計測では、衝突のようなプラス、マイナス両方向の運動を記録するのは不可能である。

デジタル式大型ストップウォッチはデジタル式で表示するので、分かりやすいが、価額が10万円以上と、高価である。表示されるのは時間である。測定に大きな空間を必要とする。速度は二つの光電スイッチの距離を表示された時間で割って求める。逆方向の運動は測定できない。

そこで本研究では超音波を用いた送信機と受信機を分離した移動物体の速度計測手法を提案した。送信機は移動物体に搭載され、連続的に40kHzの超音波を送信する。受信機は超音波を受

信し増幅した信号をコンパレータによって二値化しデジタル信号としてマイクロコンピュータで処理する。マイクロコンピュータでは、一つのタイマ・カウンタで超音波の波をカウントし、もう一つのタイマ・カウンタでクロックすなわち時間をカウントする。複数個の波に相当する時間から移動物体の速度計測が可能となる。

2. 計測方法

2.1 計測原理

Fig.1 に超音波の波形から速度を求める概念図を示す。 T を超音波の受信信号の周期とする。2つのタイマ・カウンタで N 個の波に相当する時間 t を計測する。送信機と受信機の相対距離が変動すると、ドップラ効果により、受信信号の周期が変化する。受信信号の周期を測定することによって、送信機の速度が求められる。

物理実験で力学台車の運動を測定する場合に、10Hzあるいは50Hzの時間間隔の速度計測が要求される。50Hzの時間間隔で超音波の波をカウントした場合40kHzの超音波の波の数は800となる。パルス信号をマイクロコンピュータでカウントを行う場合、±1カウント・エラーが生じる。±1カウント・エラーによる誤差は1/800となる。一方50Hzの時間間隔で800個の波に相当する時間を計った場合、±1カウント・エラーによりクロックのカウント値の逆数の誤差が生じる。マイクロコンピュータのタイマ・カウンタの入力に1MHzのクロックを用いた場合、50Hzの時間間隔

で 20000 個のカウントを行うので, ± 1 カウント・エラーによる誤差は $1/20000$ となる. つまり二つのタイマ・カウンタで超音波の波とクロックをカウントする場合には, クロックが十分に高速であれば, 誤差を抑えることができる.

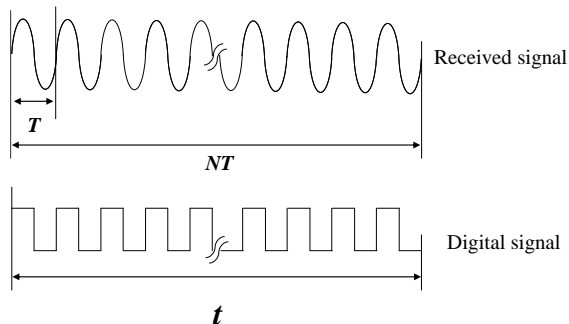


Fig.1 Count of received supersonic wave

速度は次のように求められる. 受信機が静止していて, 送信機が速度 V_s で動くものとする. 音速を V , 送信機の出す超音波の周期を T_0 とする. このとき受信機で計測される超音波の周期 T はドップラ効果により(1)式より与えられる.

$$T = \frac{V+V_s}{V} T_0 \quad (1)$$

送信機が止まっている場合, T は一定となって T_0 と等しい. 動くとき T が変化する. (1)式を変形すると

$$V_s = \frac{V(T-T_0)}{T_0} \quad (2)$$

となり, N 個の波をカウントする場合の速度は次式で与えられる.

$$V_s = \frac{V(t-NT_0)}{NT_0} \quad (3)$$

タイマ・カウンタがオーバーフローすると, 値が 0 に戻る. 本手法ではクロック信号を 16 ビットのタイマ・カウンタでカウントする. タイマ・カウンタの増分 ΔC_i は次式で与えられる.

$$\Delta C_i = \text{mod}(C_{i+1} + 2^{16} - C_i, 2^{16}) \quad (4)$$

ΔC_i が Fig.2 の t に相当する.

$$t = \Delta C_i T_{clk} \quad (5)$$

T_{clk} はクロックの周期である. t を用いて(3)式から送信機の速度 V_s が求められる.

2.2 装置構成

Fig.2 と Fig.3 に本研究の装置構成を示す. Fig.4 と Fig.5 は送信機と受信機の実物を示す. 送信機は 40kHz の信号を作成しマイクロコンピュータ (ATTiny2313) で直接超音波送信センサ T40-16(Nicera)を駆動する. 受信には超音波受信センサ R40-16(Nicera)を用いた. 受信機には 2 個のタイマ・カウンタとシリアル通信機能 USART 機能を搭載した ATMEL のワンチップマイクロコンピュータ (ATTiny2313) を用いた. タイマ・カウンタ TCNT0 に超音波の信号を入力し, タイマ・カウンタ TCNT1 に 1MHz のクロック信号を入力した. 得られたデータを無線通信ツール XBee を用いて PC に転送する. PC では, 速度データから Excel を使って速度のグラフを表示することができる.

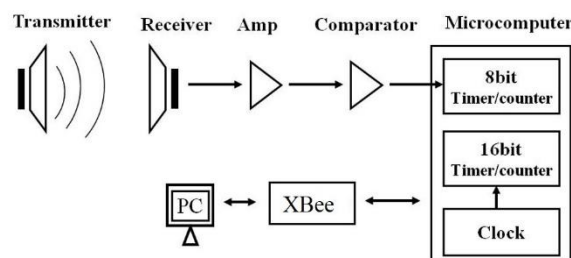


Fig.2. Concept of measurement (1)

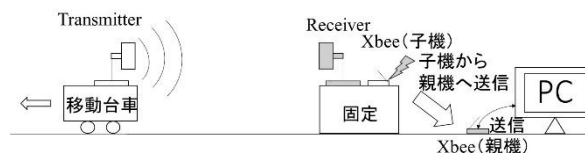


Fig.3. Concept of measurement (2)

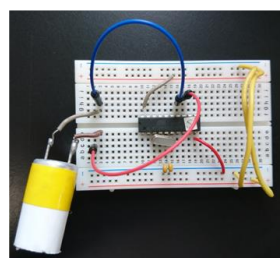


Fig.4. Transmitter

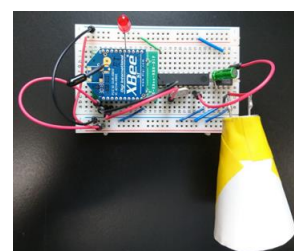


Fig.5 Receiver

3. 実験

提案した速度計測手法の妥当性を検討するため, 高等学校の物理教育で用いられる実験を念頭において, いくつかの検証実験を行った. 今回開発した送受信装置の場合, 送信および受信の超音波センサを対向させた状態で 10m までの範囲で測定が可能であった.

送信および受信の超音波センサの向きがずれ

ることにより、測定可能な範囲は小さくなる。しかし今回使用した超音波センサの指向性は、半値全角が 100 度と広い為、仮に送信および受信の超音波センサが対向させた状態から 50 度ずれても、5m 程度の範囲までは測定が可能である。

3.1 等加速度運動の計測

斜面上で力学台車を動かし等加速度運動の計測を行った。超音波の地面からの反射を抑えるため、送信機の超音波センサにコーン状のカバーを付けて、超音波の広がりを抑えた。例として傾斜を 7.0°とした場合の提案手法、記録タイマそれぞれの計測結果を Fig.6, Fig.7 に示す。

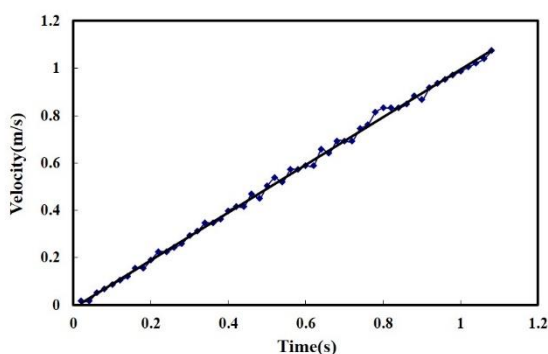


Fig.6. Uniformly accelerated motion measured by proposed method

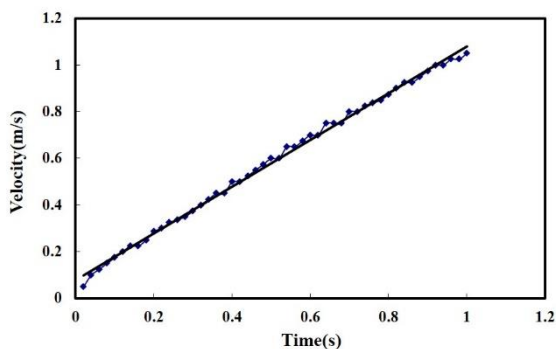


Fig.7. Uniformly accelerated motion measured by record timer

提案された手法で求められた加速度は 1.007m/s^2 で、記録タイマで求められた加速度は 1.000m/s^2 とよく一致している。記録タイマでは最初の低速度の状態では、打点を分離して認識できないため、速度計測ができないのに対し、提案された手法は運動中のすべて状態で速度を計測することができる。

Table1 に示すように斜面の傾きを変えていくつかの実験を行った。いずれも提案された手法と記録タイマの加速度はよく一致している。

Table1. Comparison between proposed method and record timer measurement

Angle(°)	Acceleration (m/s^2)		Measurement error (m/s)	
	Ultrasonic sensor	Recording timer	Ultrasonic sensor	Recording timer
3.0	0.217	0.215	1.605E-04	0.261E-04
4.0	0.420	0.421	3.614E-04	0.667E-04
5.0	0.627	0.623	1.516E-04	1.513E-04
6.0	0.746	0.745	4.247E-04	1.358E-04
7.0	1.007	1.000	1.683E-04	2.303E-04

3.2 自由落下運動の計測

自由落下運動の計測は、測定時間が短く、また重力加速度を求めるために摩擦の少ない高精度の測定が要求される。高さ約 2m の場所に受信機を設置し、送信機を落下させた。床にはクッションを置いて送信機の着地時の衝撃を緩和した。また、超音波送信センサを真上に向けるため、送信機の上部に超音波送信センサを配置し、重心を送信機の下部になるように設定した。

得られたデータを Fig.8 に示す。等加速度運動実験と同様に、50Hz の時間間隔で測定を行った。測定データから得られた重力加速度は 9.77m/s^2 となり、高い精度で重力加速度が求められることが確認できた。

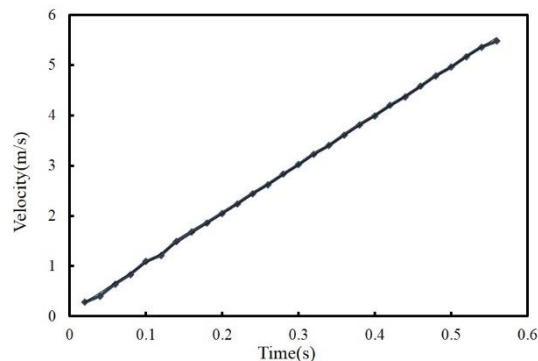


Fig.8. Free fall motion measured by proposed method

3.3 衝突運動の計測

記録タイマはその構造上、一方向でしか速度計測することができない。提案された手法は、ドップラ効果による受信信号の周期の変化を計測することにより速度を算出している。つまりマイナス方向の速度の計測も可能である。このことを確認するために、送信機を搭載した力学台車を横方向に走らせ、壁に衝突させた運動を計測した。結果を Fig.9 に示す。摩擦があるため減速運動している力学台車が衝突によって逆方向に運動していることが確認できた。また衝突時のエネルギー損失によって衝突後に速度の大きさが小さくなることも確認できた。

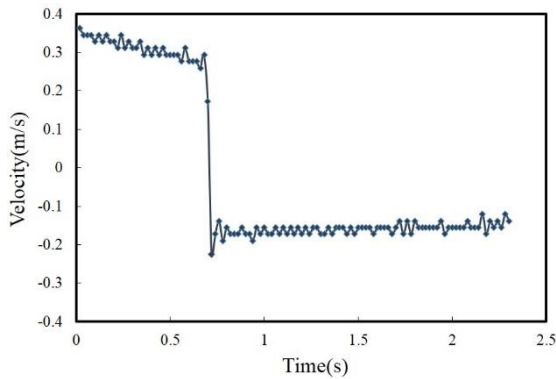


Fig9. Collision motion measured by proposed method

4. 誤差分析

4.1 超音波の伝達誤差

本手法で正確に速度計測を行うためには、超音波の波の数を正確にカウントする必要がある。このためには、雑音の少ない超音波の波形信号をデジタル信号に変換する必要がある。

また、送信機が運動中に超音波センサが振動すると、受信信号の波形が変化し誤差の要因となる。このために送信機上の超音波センサが振動しないような対策をとることが重要である。

4.2 温度による計測誤差

音速は温度によって異なる。1 気圧中の音速は $331.5 + 0.61t$ (t は摂氏温度) である。

基準温度を 25 度に設定して、温度が 1 度変化すると、音速の変化は 0.18% である。(3)式より求められる速度の誤差も 0.18% となる。高い精度を要求される場合、温度の補正が必要である。

4.3 速度の分解能

本手法では、複数個の波に相当する時間を、クロックをカウントすることにより求めている。このためクロックのカウントが測定できる速度の分解能を決定する。1MHz のクロックをカウントする場合、(3)式より速度の分解能は 0.017m/s となる。つまりこの値より小さい速度の差を求めることはできない。測定できる速度の分解能を向上させるには、クロックの速度を早くすればよい。

5. まとめ

本研究では超音波の送信機と受信機を分離してマイクロコンピュータを用いて複数個の波に相当する時間から速度を計測する手法を提案した。実験により約 10m までの範囲で、0.017m/s の分解能で速度測定が可能であることを確認した。測定範囲を広げるには、例えばより高出力の超音波の送信機を用いればよい。

本手法を検証するため記録タイマとの比較を行ったが、両手法で求められた加速度はよく一致している。

本手法の特徴は以下の点である。開発された装置は低価格で構成することができる。送信機は、力学台車や落下物体に取り付けることができる。測定データは無線通信ツール XBee により簡単に PC に送信し、実験台とパソコンの距離の制限が解消される。また静止状態や低速度の計測および逆方向の速度計測が可能である。本手法では、非接触の測定により空気抵抗や摩擦を極力抑えた測定が可能となった。これらの特徴を生かして自由落下による重力加速度の計測や逆方向の運動を含む衝突運動の計測も可能となった。本手法は物理実験のみでなく、数メートルの範囲の一次元方向の移動物体の連続的な速度測定に有効である。

参考文献

- [1] 星野貴弘, 鈴木聡太郎, 小室孝文, 三ツ堀裕太, 浜松芳夫 “教育利用を目的とした加速度運動実験支援ソフトウェアの開発とその評価実験”, 電気学会論文誌 基礎・材料・共通部門誌, 136(8) 517-528, 2016 年 8 月
- [2] 布施雅彦, 鈴木三男, 湊淳, 小澤哲, 増田健二 “高校の物理教育のためのビデオ画像を用いたコンピュータによる新しい教育手法の開発”, CIEC 会誌, Vol.13,pp.85-91, 2012
- [3] 関口道也, 山崎弘道, 湊淳, 小澤哲 “LED と光電池を使用した時間計測装置の開発”, 物理教育, Vol.55, No.1, pp.15-20, 2007