



Title	超音波の位相差による位置計測とヒューマンインタフェースへの応用
Author(s)	野中, 秀俊; Nonaka, Hidetoshi; 伊達, 惇 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 163, 11-24
Issue Date	1993-03-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42354
Type	departmental bulletin paper
File Information	163_11-24.pdf



超音波の位相差による位置計測とヒューマン インタフェースへの応用

野中 秀俊・伊達 惇

(平成 4 年 10 月 28 日受理)

Supersonic Position Measurement and its Applications to Human Interface

Hidetoshi NONAKA and Tsutomu DA-TE

(Received October 28, 1992)

Abstract

This paper presents new position measuring method and its applications to human interface. It is based on the principle of supersonic position measurement by phase difference. Any kinds of motor actions of users is available to screen pointing by the device, then it allows computer users various pointing styles including "mouse-like" one.

Firstly, the principle and the formulae of supersonic position measurement are introduced. Secondly, trial construction of the pointing system is described, and performance of the pointing system is investigated using test system constructed with X-Y plotter. Finally some examples of pointing devices with various pointing styles are realized, and experiments on the efficiency of pointing tasks with computer users are carried out to conclude that the pointing system is suitable for practical use.

1. はじめに

近年、より知的なヒューマンインタフェースが要求されるようになり、ヒューマンインタフェース研究が多く行われるようになった。この理由としては、コンピュータ利用がより一般化し、パーソナルなものになったという社会的要因と、コンピュータが安価化、高速化、高性能化し、CPU の能力に余裕ができてきたという技術的要因がある(もちろんこれらの 2 つの要因同士も密接な関係にある)。

しかしコンピュータは年々小型化・高性能化することによって、多様な利用形態が期待できるにもかかわらず、いまだにキーボードとマウスといった固定化されたインタフェースの利用を前提としているため、ユーザの操作方法はほとんど変わっていないといえる。例えばラップトップパソコンやノートパソコンといった可搬型コンピュータでもキーボードの利用が前提となっており、ユーザの姿勢が拘束されるし、またマウスを標準入力装置とした可搬型コンピュータでは本体にトラックボールを設けるといった対処に留まっている。これらのことから、多様な利用形態に対応できる入力デバイスが、ヒューマンインタフェースに要求されるようになった。最近実

用化されてきた手書き入力（ペン入力）やタッチスクリーンなどが、ある程度この要求に応じている。

本論文で報告する位置計測方式およびそれを用いたポインティング装置（SPD）は上述の要求に応えるために開発したものである。超音波を用いた小型で非接触的な位置計測方式を採用しており、手に限らず、ユーザが動かすことのできる様々な部位を利用できるという特徴があり、壁面のコンピュータ操作や、横たわった状態でのコンピュータ操作など、ユーザの利用形態の自由度が大きい。例えばキーボードなど他の入出力装置を使用しながら行うポイント操作や、医療用コンピュータ入出力など、幅広い応用範囲を有する。なお、本論文で用いた位置計測方式は、筆者らが運動視を用いたビデオ表示システム [2] を開発する際に用いた位置計測方式を改良したものである。

2. SPD の原理

2.1 超音波の位相差を利用した位置計測

従来の超音波位置計測では、超音波の伝播時間により 2 つの測定点からの絶対距離が測定され、三角測量の原理に基づいて位置が計算される。これに対し、本報告における位置計測では、2 つの測定点における超音波の位相差から、位置（相対距離）を計算するものである。超音波位置計測に位相差を利用した方式も報告されているが [1]、これは絶対距離計測に位相差を利用するという立場をとっており、結局三角測量に相当する計算を行っているという点で、本方式とは異なる。

超音波センサの位相差を利用した位置計測の原理は、以下の通りである（図 1）。被測定点に、移動方向と垂直な方向に向かって、超音波スピーカが設置され、一方 1 対の超音波マイクロフォンが被測定点に向けて並べて設置される。1 つの超音波スピーカからでた信号が、2 つの超音波マイクロフォンで受信される。スピーカを取り付けた被測定点の移動に伴い、両マイクロフォン・スピーカ間の距離が変化し、両マイクロフォンが受ける信号の位相差が変化する。この位相差が被測定点の位置データに変換される。

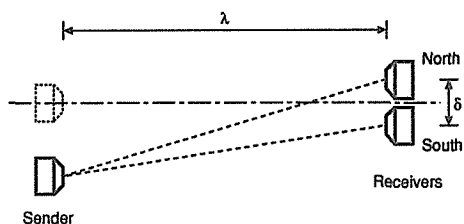


図-1 超音波の位相差による位置計測

被測定点（または超音波スピーカ）の位置を x [m]、両マイクロフォン間の距離を δ [m]、マイクロフォン・スピーカ間の垂直距離を λ [m] とすると、位相差 ϕ は式 (1) で表される。

$$\phi = \frac{2\pi f_s}{c} \left\{ \sqrt{\left(x + \frac{\delta}{2}\right)^2 + \lambda^2} - \sqrt{\left(x - \frac{\delta}{2}\right)^2 + \lambda^2} \right\} \quad (1)$$

但し f_s [Hz] は超音波の中心周波数、 c [m/sec] は音速を表す。

位相差を用いた位置測定であるため、位相差が 2π を超える場合、位相差だけから直接位置を求めることはできない。しかし、被測定点の移動速度が十分に小さいことを仮定することにより、位相 2π 以上に対応した補正が可能である（本論文の試作では、測定範囲を位相差 $\pm 16\pi$ とした）。具体的な補正方法の詳細については、第 3 章で述べる。

2.2 2次元ポインティング装置(SPD)への適用

ポインティング装置にこの原理を適用するために、超音波マイクロフォン2対を十字型に設置し、超音波スピーカの平面内の位置を計測する(図2)。原理的には、3個のマイクロフォンにより2次元の位置計測が可能であるが、マイクロフォンを4個(2対)使用し上述の配置を採用した場合、その対称性により、位相差から位置データへの変換において有用な性質が得られる。以下に被測定点の座標から位相差への変換を定式化し、さらに近似を用いてその逆変換式を導く。

x, y に対する位相差をそれぞれ ξ, η とすると、式(1)により、

$$\xi = \frac{2\pi f_s}{c} \left\{ \sqrt{\left(x + \frac{\delta}{2}\right)^2 + y^2 + \lambda^2} - \sqrt{\left(x - \frac{\delta}{2}\right)^2 + y^2 + \lambda^2} \right\} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{2\pi f_s}{c} \left\{ \sqrt{x^2 + \left(y + \frac{\delta}{2}\right)^2 + \lambda^2} - \sqrt{x^2 + \left(y - \frac{\delta}{2}\right)^2 + \lambda^2} \right\} \quad (3)$$

と表される。ここで δ が λ に対して十分小さいことに注目し、 $\frac{\delta}{\lambda} = 0$ の周りで展開すると、

$$\xi = \frac{2\pi f_s}{c} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{x}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{y}{\lambda}\right)^2}} \frac{\delta}{\lambda} x + o\left(\frac{\delta}{\lambda}\right)^3 \right\} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{2\pi f_s}{c} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{x}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{y}{\lambda}\right)^2}} \frac{\delta}{\lambda} y + o\left(\frac{\delta}{\lambda}\right)^3 \right\} \quad (5)$$

となる。式(4)、(5)の第1項をそれぞれ $\tilde{\xi}, \tilde{\eta}$ と定義すると、以下の近似式を得る。

$$\tilde{\xi} = \frac{2\pi f_s}{c} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{x}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{y}{\lambda}\right)^2}} \frac{\delta}{\lambda} x \right\} = C \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{\lambda}\right)^2}} \frac{\delta}{\lambda} x \quad (6)$$

$$\tilde{\eta} = \frac{2\pi f_s}{c} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{x}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{y}{\lambda}\right)^2}} \frac{\delta}{\lambda} y \right\} = C \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{\lambda}\right)^2}} \frac{\delta}{\lambda} y \quad (7)$$

但し、 $C \stackrel{\text{def}}{=} \frac{2\pi f_s}{c}$ 、 $r \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{x^2 + y^2}$ とする。ここで行なった近似の、絶対誤差および相対誤差は以下の式でおさえられる。

$$|\tilde{\xi} - \xi| \leq C \frac{1}{8} \left(\frac{\delta}{\lambda}\right)^3 x, \text{ 等号は } x = y = 0 \quad (8)$$

$$|\tilde{\eta} - \eta| \leq C \frac{1}{8} \left(\frac{\delta}{\lambda}\right)^3 y, \text{ 等号は } x = y = 0 \quad (9)$$

$$\frac{|\tilde{\xi} - \xi|}{|\xi|} \leq \frac{1}{8} \left(\frac{\delta}{\lambda}\right)^2, \text{ 等号は } x = y = 0 \quad (10)$$

$$\frac{|\tilde{\eta} - \eta|}{|\eta|} \leq \frac{1}{8} \left(\frac{\delta}{\lambda}\right)^2, \text{ 等号は } x = y = 0 \quad (11)$$

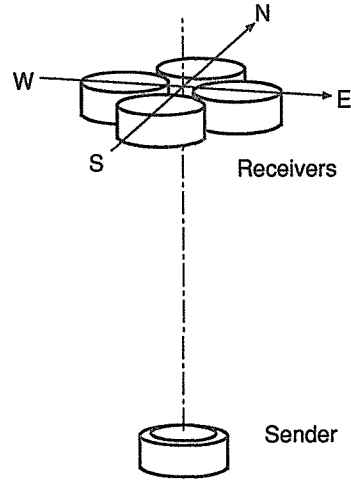


図-2 2次元位置計測におけるセンサの配置

x, y に関する連立方程式(6), (7)が簡単に解くことができ、

$$x = \frac{\lambda}{\sqrt{C^2\delta^2 - \tilde{\xi}^2 - \tilde{\eta}^2}} \tilde{\xi} = \frac{1}{\sqrt{C^2 - \left(\frac{\rho}{\delta}\right)^2}} \frac{\lambda}{\delta} \tilde{\xi} \quad (12)$$

$$y = \frac{\lambda}{\sqrt{C^2\delta^2 - \tilde{\xi}^2 - \tilde{\eta}^2}} \tilde{\eta} = \frac{1}{\sqrt{C^2 - \left(\frac{\rho}{\delta}\right)^2}} \frac{\lambda}{\delta} \tilde{\eta} \quad (13)$$

となる。但し、 $\rho \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{\tilde{\xi}^2 + \tilde{\eta}^2}$ とする。また、

$$\frac{\tilde{\xi}}{\tilde{\eta}} = \frac{x}{y} \quad (14)$$

により、原点からの方向が保存されること、

$$\rho = C \frac{\delta r}{\sqrt{\lambda^2 + r^2}}, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} \rho = C\delta = \frac{2\pi f_s}{c} \delta \quad (15)$$

により、 $(x, y) \rightarrow \infty$ に対して、 $(\tilde{\xi}, \tilde{\eta})$ は半径 $\frac{2\pi f_s}{c} \delta$ の円周上に収束することが示される。

以上で、測定値としてえられる位相差データから目的の位置データへの変換は式(12), (13)によって十分正確に得られることが示された。

3. SPD の構成

前章で述べた原理に基づいてポインティング装置を試作した。図3に回路部分のブロック図を示す。

4つの超音波マイクロフォンを2つずつ対にして考え、便宜上North-South, East-Westと呼ぶことにする。計測データがI/O インタフェースを通してコンピュータに読み込まれるまで、North-South方向とEast-West方向とは、独立に処理されるので、ここではNorth-Southについての

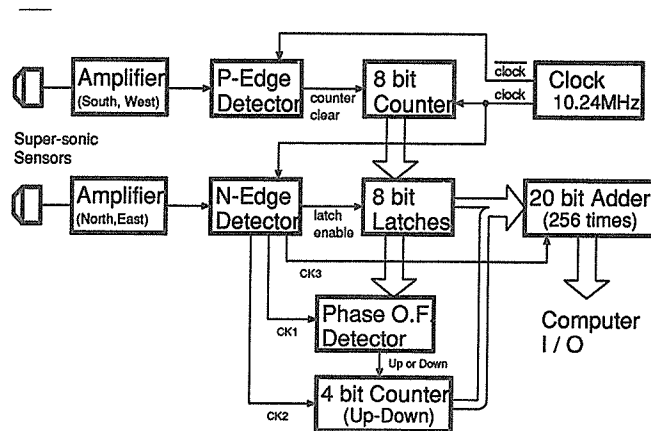


図-3 位相差計測回路のブロック図

みその動作の概要を説明する。

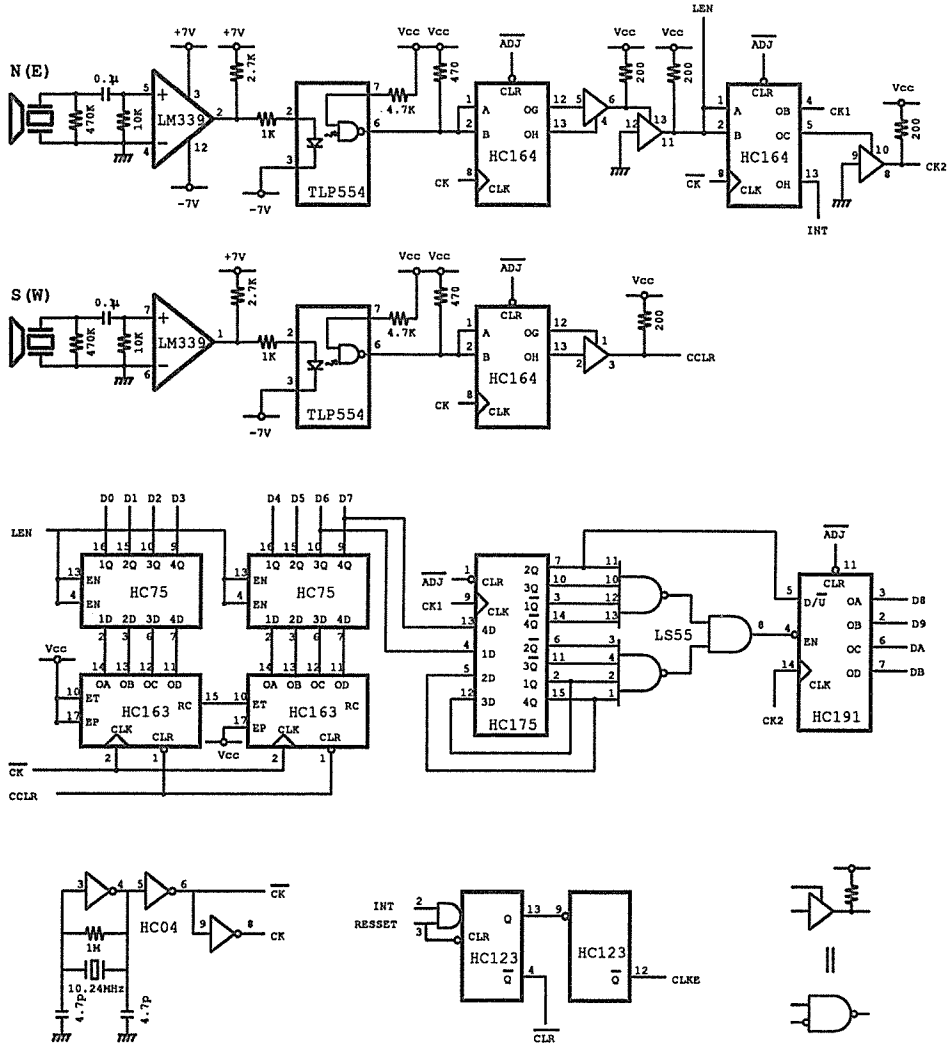


図-4 試作機の回路図1 (位相差計測)

3.1 位相差計測

位相差計測回路の回路図を図4に示す。一対の超音波マイクからの受信波(40 [KHz])はアンプにおいてTTLレベルの矩形波に変換される。South側の受信波の立ち上がりが検出されると、10.24[MHz]のクロックによりパルス幅約100 [nsec]のカウンタクリア信号が生成される。この信号により、8 bit同期カウンタ(同期クリア)がクリアされる。このカウンタは、このタイミングでクリアされる場合以外は常に

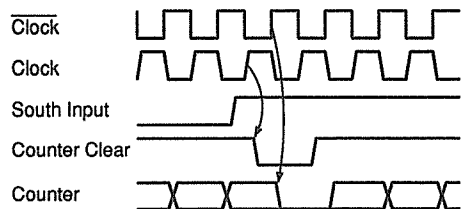


図-5 カウンタ側の各信号のタイミング

10.24 [MHz] のクロックでカウントし続ける (図 5 参照)。

一方 North 側の受信波の立ち下がりが検出されると、パルス幅約 100 [nsec] のラッチイネーブル信号が生成される。この信号によって、上の同期カウンタの出力データが 8 bit ラッチに保持される。これにより、カウンタクリアからラッチイネーブルまでの時間が 10.24 [MHz] のクロックでカウントされることとなり、8 bit から成る位相差データ (8 bit Synchronous Counter) が得られる (図 6 参照)。

プロトタイプではカウンタ側 (South) とラッチ側 (North) とで同位相のクロックを使用したが、両受信波の位相が一致するときに保持データの値が不定となる現象が生じたため、「North 側の立ち上がり検出のためのクロックとカウンタのクロック」、「ラッチ側の立ち下がり検出のためのクロックとラッチイネーブル信号」および「カウンタのクロックとラッチイネーブル信号」を、いずれも互いに逆位相になるように変更した。

カウンタクリア信号の生成には South 側入力信号の立ち上がりを用い、ラッチイネーブル信号の生成には North 側入力信号の立ち下がりを用いた。検出のタイミングをこのように違えたのは、両受信波の位相が一致したとき、すなわち被測定点が正面にあるときに位相差が $0(2\pi)$ となってカウント値が不連続になることを避けることを意図したものである。この不連続は結局補正されるので、このような配慮は必ずしも必要ないが、実際の使用に際しての初期設定がしやすいという利点があるので、そのまま採用した (次節参照)。

なお使用した超音波センサの外形および受信側のセンサの配置は図 7 および図 8 の通りである。

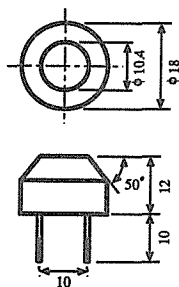


図-7 使用した超音波センサの外形
(単位: mm)

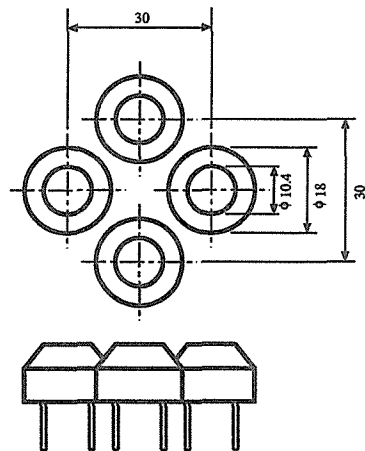


図-8 受信側のセンサの配置

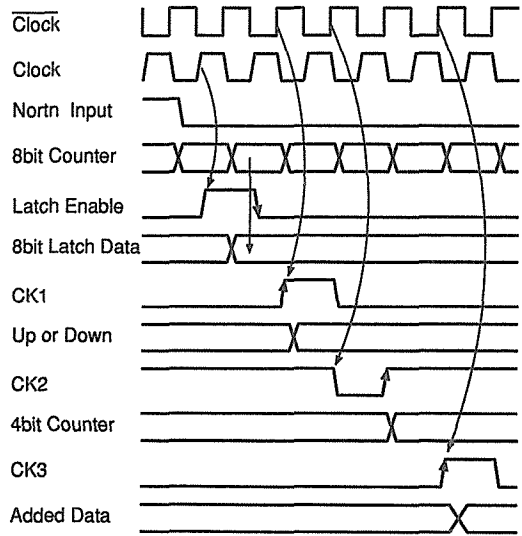


図-6 ラッチ側の各信号のタイミング

3.2 位相差オーバーフロー補正の原理

超音波の周波数は 40KHz でありクロックの周波数が 10.24MHz であることから、位相差 2π が 256 カウントに対応することになる。よってカウント数のオーバーフローが、それぞれ位相差の 1 周期分のオーバーフローに対応する。このオーバーフローはカウント数が不連続的に変化することを利用して、オーバーフローが検出される (図 4 における HC175)。そしてカウント数が 256 を超えるたびに 4bit UP-DOWN Counter (図 4 における HC191) がカウントアップされ、逆にカウント数が 0 を下回るたびに 4bit UP-DOWN Counter がカウントダウンされる (図 9 参照)。

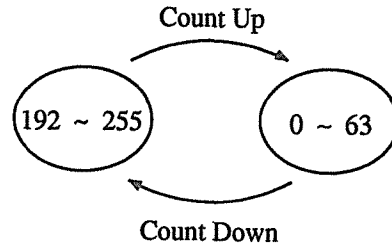


図-9 同期カウンタ (8 bit) の状態と UP-DOWN カウンタ (4 bit) の動作

ちなみにこの検出方法が不可能になる (すなわち 1 回の位相差の変化が π を超える) 場合の移動速度を計算してみると、例えば $\lambda=10$ [cm], $\delta=3$ [cm] のとき、被測定点の移動速度が約マッハ 19 以上となった場合に相当するが、そのような場合は明らかに無視して良い (それ以前にドップラー効果のため、超音波マイクロフォンの周波数特性に適合せず、受信不能となるであろう)。

上の動作により、毎秒 40000 の 12bit (上位 4bit+下位 8bit) の測定データが得られる。測定範囲は、位相差で $\pm 16\pi$ となり、これにともなってマイクロフォンの配置を決める定数 δ の範囲は、以下のようになる (式(15)参照)。

$$0 < \delta < 8c/f \approx 9.3 \quad (16)$$

なお計測開始時において初期設定として、Up-Down カウンタをクリアする必要があるが、そのとき被測定点は位相差 $0 \sim 2\pi$ になければならない。前節で述べたように、被測定点が正面にあるとき位相差は π となっているので初期設定がしやすくなっている。

3.3 加算平均

3.2 節の補正によって得られる 12bit のデータの数は、超音波の周波数に等しく、毎秒 40000 である。この段階でのデータは、超音波の不安定さのため、矩形波への変換時に揺らぎを生じていることが原因で、ばらついた値となっている。しかし用途がポインティング装置であって、CRT モニタの垂直走査時間内に必要なデータは 1 つだけなので、加算平均によりこのばらつきをおさえることができる。

本試作では補正されたデータはさらに図 10 に示すように 20 bit の Full Adder によって 256 個が加算され、下位の 4 bit が無視され、最終的に 16 bit のデータが得られる。この加算データを得るために要する時間は、6.4 [msec] である。市販の通常の CRT モニタの垂直走査時間は 15~18 [msec] 程度なので、ノンインタレース画面の各フレームにおけるカーソルの座標計算のために十分な速さと考えられる。

4. 動作試験

SPD の動作試験を行なうために、XY プロッタを利用したテストシステムを構成した (図 11)。送信側の超音波スピーカを、XY プロッタのペンマウントに固定し、受信側の超音波マイクロフォ

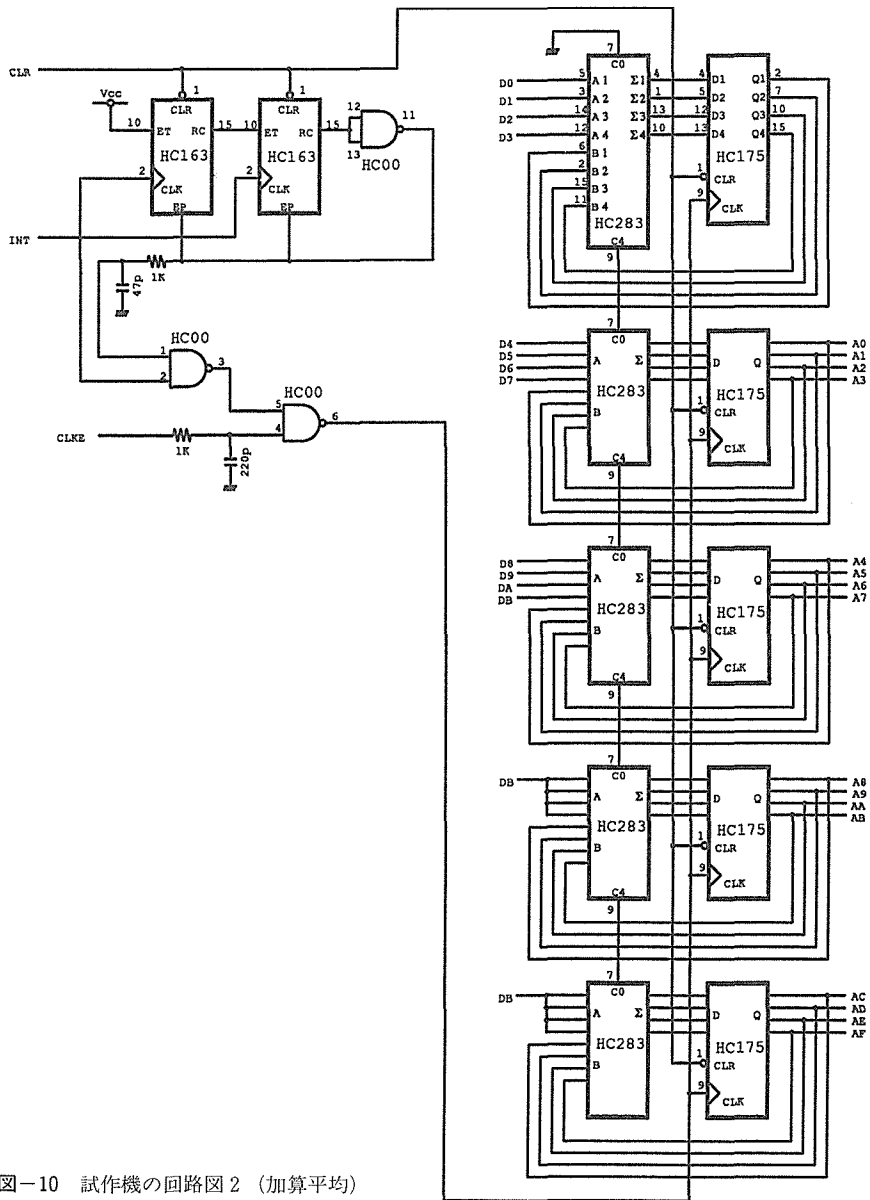


図-10 試作機の回路図2 (加算平均)

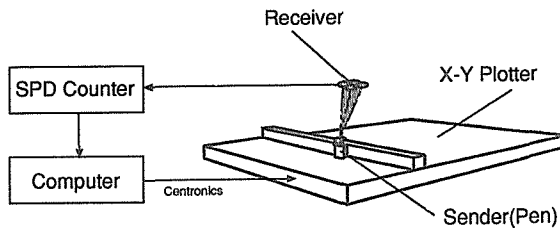


図-11 動作試験装置

ン (2対) を XYプロッタの上部 (高さ可変) に固定する。そしてコンピュータでペン移動を制

御するのと同時に SPD を用いてペンの位置を測定する。これにより SPD の静特性、動特性を得ることができる。なお使用したプロッタは、ペンの位置決め精度が 0.1 [mm] 以下、最大速度が 60 [cm/sec]、作図面積は A1 サイズ、インタフェースはセントロニクス仕様で、ペン移動命令実行からペンの移動開始までに要する時間が、ディスプレイの垂直走査時間(約 17.7 [msec]) 以内であることが確認されている。

4.1 静止状態での測定

ポインティング装置においては特にカーソルの静止状態での安定性が要求されるが、実際の使用にあたっては、温度の影響、風の影響、周辺からの反射波の混入、超音波周波数の揺らぎ、ノイズの影響などが付加される。ここではセンサの静止状態での測定を行い、これらを評価する。

スピーカの移動平面とマイクロフォンの間の距離を 10 [cm], 20 [cm], 30 [cm] として、原点から 7 [cm] まで、5 [mm] きざみの各点にスピーカを固定し、それぞれ 100 回の測定を行なった結果、データのばらつきの幅(最大値と最小値の差)は 30 カウント以内であった。これにより測定データ 16 bit のうち上位 12 bit が安定したデータとして得られることが確認された。また X-Y プロッタで様々な図形を描画し、その測定値から(式 12)(式 13)に従って変換を施すと、ほぼ正確に図形が再現されることが確認された。周囲に存在する物体からの反射波の測定データへの影響が微妙に認められたが、ポインティングへの応用においては、測定の精密さ(precision)が十分であれば正確さ(accuracy)の欠陥はある程度許容できるので、実用上問題はないと考えられる。

4.2 応用例と実験

SPD を利用したポインティングの形態としては、様々なものを想定することができる。本報告では、マウス型(図 12)、ペン型(図 13)、ベルト取付式(図 14)の 3 種類の装置を実際に作成し、これらを利用してポインティングの形態を設定し、被験者に簡単なポイント操作を課することに

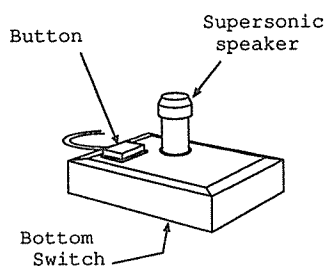


図-12 マウス型ポインティング装置

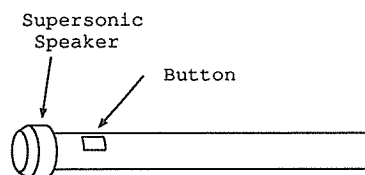


図-13 ペン型ポインティング装置

よって実用性の検証を行なった。

マウス型装置は、テーブルに置いてマウスのように操作するもので、底部のスイッチの使い方により、以下に挙げのようなポインティングの形態が設定できる。

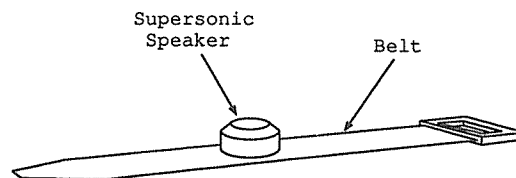


図-14 ベルト取付式ポインティング装置

- スイッチが on のとき装置の動きに対応してカーソルを移動させ、off のときはカーソルを停止させることにより、通常のマウスと同様なポインティングの形態が実現できる。

- スイッチが on のときペンダウン、off のときペンアップとし、カーソルは装置の動きに対応して常に移動させることにより、通常のマウスよりもペン入力に近いフリーハンド図形入力を実現できる。
- スイッチが on のとき装置の動きに対応してカーソルを移動させ、off のときは off となった瞬間のカーソルの移動速度（速さと方向）でカーソルを移動させることにより、慣性機能を持ったポインティングの形態が実現できる [3]。

ペン型装置はペンのように持って人差指でクリックする形態の他に、ハンディライトのように持って親指でクリックするという形態もある。またベルト取付式を使用して、ユーザの頭部、手首、足などの動きによるポインティングが可能である。

4.2.1 実験の方法

被験者は CRT ディスプレイの正面約 50 [cm] の位置で椅子に腰かけた状態でポインティング装置を操作し、4×4 dot のカーソルを移動させ、CRT ディスプレイのターゲットに合わせてクリックすることを要求される。ターゲットは 16×16 dot の正方形で、乱数による座標に表示される。正しくクリックされるとターゲットが消え、また新たに乱数による座標にターゲットが表示される。1 回の実験で計 200 個のターゲットが順次表示され、それぞれ表示されてから正しくクリックされるまでの時間が計測される。

ポインティングの形態として、ここでは下の 4 通りを採用し、各形態について 3 回、のべ 12 回の実験を行なった。なおいずれの実験においても、被験者はマウスの操作に熟達しており、また SPD によるポインティング装置はこの実験で初めて使用したものである。

1. 通常の機械式マウス（マウスの移動距離 8 [cm] に対し、カーソルの移動距離が 500 dot）を使用する。クリックには左ボタンを用いる。
2. マウス型ポインティング装置（図 12）を使用する。被験者は上面のボタンをクリックに用いる。底部のスイッチが on のとき、すなわち装置がテーブルから持ち上がっている間カーソルが停止するように設定されている。
3. ペン型ポインティング装置（図 13）を使用する。受信側のセンサは CRT ディスプレイのすぐ下に正面を向けて取り付けられる。被験者はボタンを人差指で押すように持つ。このボタンが押された状態ではセンサの動きに応じてカーソルが移動し、離された状態ではカーソルが停止している。クリックは別に用意されたスイッチで行なう（左手）。
4. 超音波スピーカが被験者の頭部に固定される。受信側は被験者の頭上約 15 [cm] に設置される。クリックは別に用意されたスイッチで行なう（右手）。

4.2.2 実験結果と考察

4 通りのポインティング装置に対する各 3 回の実験の結果を（図 15）（図 16）（図 17）（図 18）に示す。横軸はターゲットが表示された時点でのカーソルからターゲットまでの距離を、縦軸はポイントに要した時間を表す。またグラフ内の直線は、3 回の実験のデータをまとめて回帰直線を計算したものである。実験結果より、以下のような結論が得られる。

マウス型装置およびペン型装置を使用した場合、通常のマウスの場合よりポイント操作が速いという傾向がある。このことを検証するために平均値に差がないという仮説を立て、検定統計量として

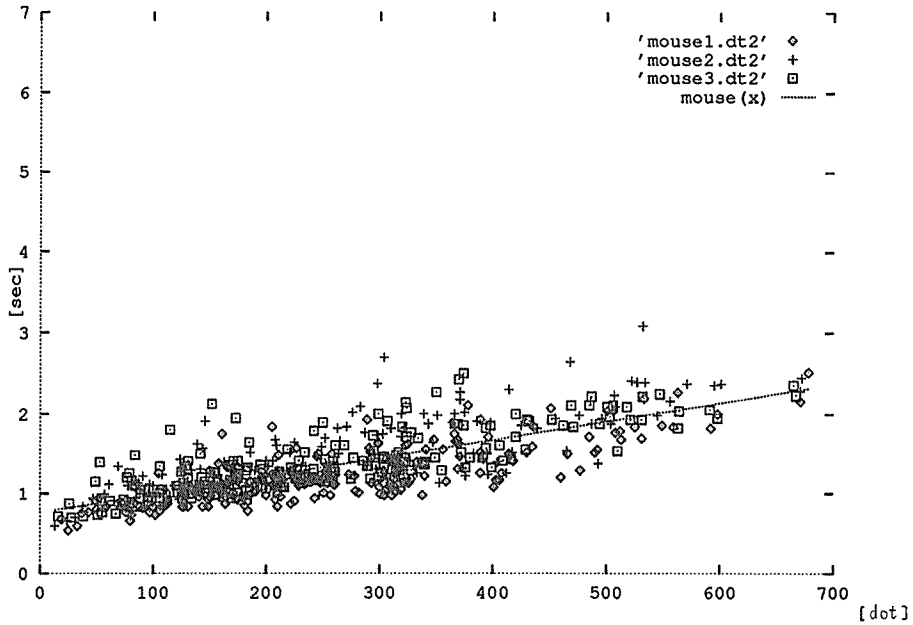


図-15 マウスのポインティングに要する時間の分布

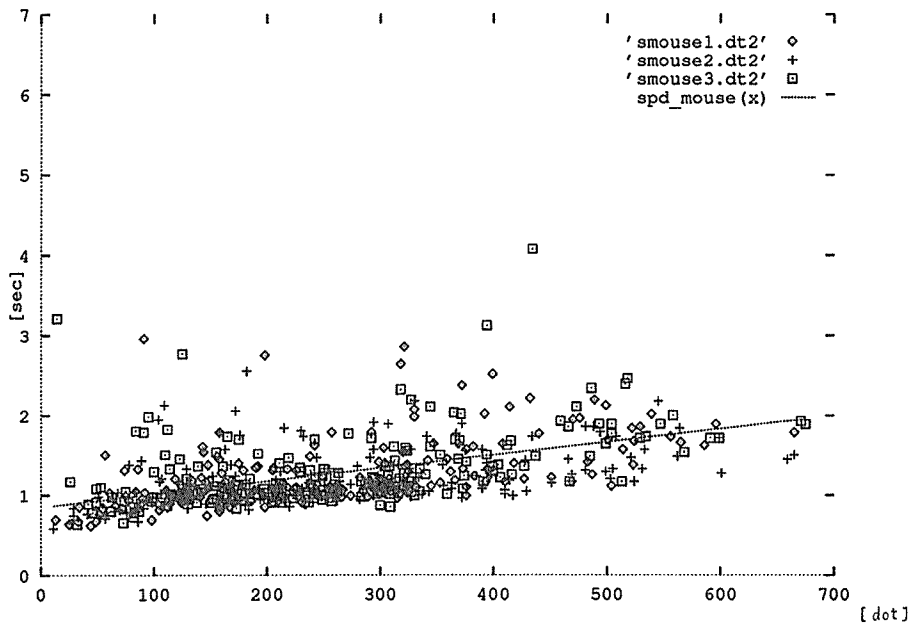


図-16 マウス型装置のポインティングに要する時間の分布

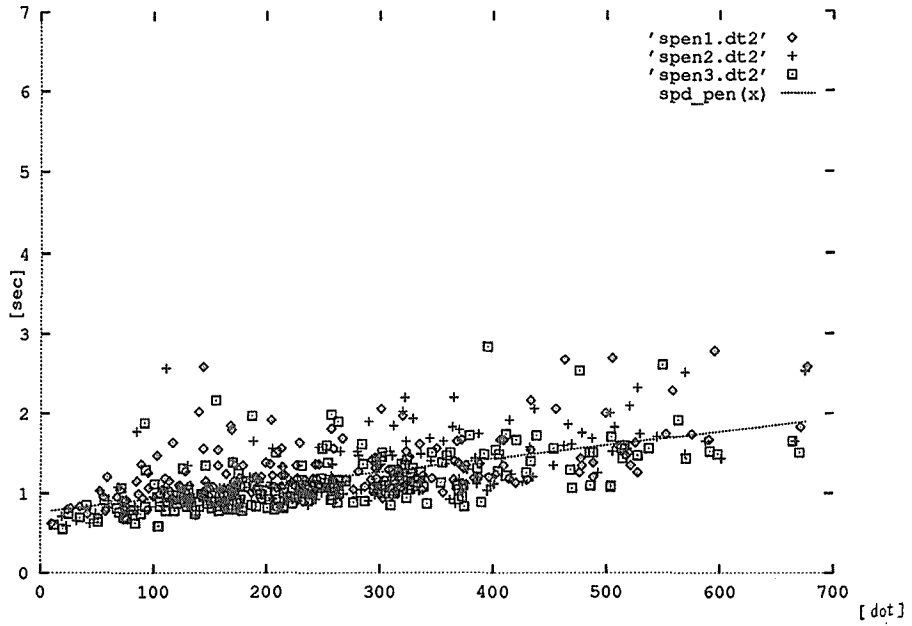


図-17 ペン型装置のポインティングに要する時間の分布

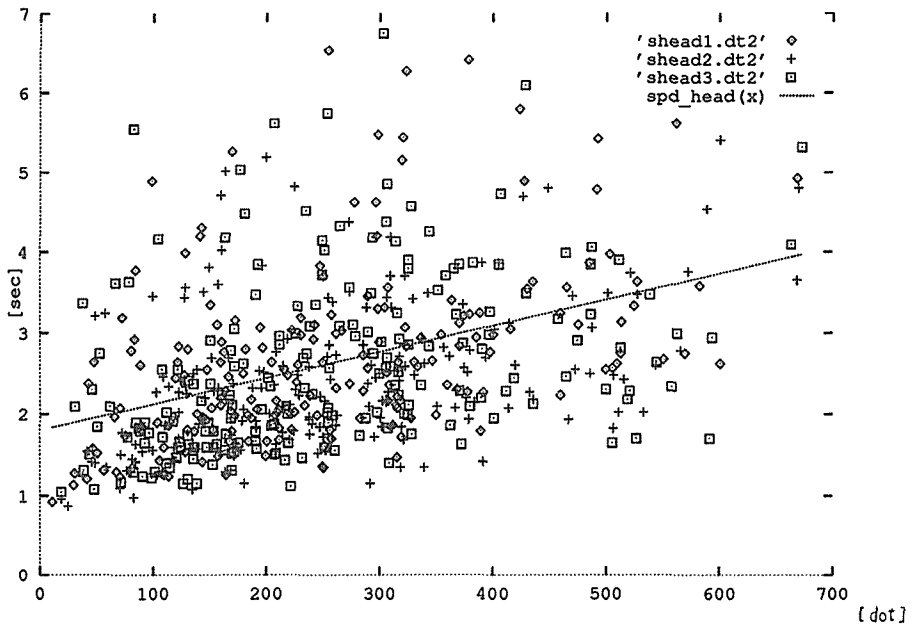


図-18 頭部にセンサを取付けた場合のポインティングに要する時間の分布

$$t_m = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{S_{xx1} + S_{xx2}}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \sim t(n-2), \quad S_{xx} \text{ は偏差の平方和} \quad (17)$$

を用いると、マウス型装置では $t_m = 2.93$ 、ペン型装置では $t_m = 6.76$ となり、いずれも危険率 0.5% で棄却される。

マウス型およびペン型装置の場合、通常のマウスの場合に比べて、回帰直線の勾配が小さい。このことからマウス型装置およびペン型装置を使用した場合のほうが、通常のマウスを使用した場合よりも距離の影響を受けにくいということが考えられる。このことを検証するために、対応するデータ毎の差に対して得られた回帰直線 $y = \beta_0 + \beta_1 x$ において、仮説 $\beta_1 = 0$ を立て、検定統計量として

$$t_g = \beta_1 \sqrt{\frac{(n-2)S_{xx}}{S_e}} \sim t(n-2), \quad \text{但し } S_e \text{ は残差平方和} \quad (18)$$

を用いると、マウス型装置では $t_g = 4.11$ 、ペン型装置では $t_g = 5.42$ となり、いずれも危険率 0.5% で棄却される。

以上の結果が得られた理由としては、機械式マウスに比べてマウス型装置、さらにペン型装置の方が、操作時に摩擦や抵抗を受けにくいことや、ポイント装置の移動距離が大きくなると、装置自身の向き（姿勢）が変化する傾向にあり、機械式マウスではこの影響を受けるが、マウス型装置やペン型装置ではこのような影響を受けないことなどが考えられる。ただし、これらの結果はここで使用した特定の機械式マウスについて得られた結果であり、必ずしもあらゆるマウスがスピードの点で劣っているということを示すものではない。

手によるポイント操作に比べ、頭の動きによるポイント操作は明らかに遅く、またデータのばらつきも大きくなっている。但し、回帰直線の傾きが他のデータとあまり変わらないことから、時間を要しているのは、クリック直前の位置の微調整の時であり、カーソルをターゲットの近くまで移動させるところまでは、手による操作とさほど変わらないスピードが得られていることがわかる。このことは実験者による被験者の観察からも確認されている。これにより頭の動きによるポイント操作も、例えばカーソルの大きな移動に利用する場合など、適用条件によっては、実用化の可能性があると考えられる。

実際のポインティング装置としての性能には、疲労、訓練の効果、個人差、適用条件など多くの評価要因が挙げられるが、ここでは最も重要な要因の1つととえられるポイント時間の評価を行なった。その結果今回開発した SPD が、十分実用に耐える性能を持っていることが確認された。Fitts の法則への当てはめや、モデルを構成した上での操作性の解析、さらにここで触れなかった他の要因に対する評価などは今後の課題としたい。

ま と め

超音波の位相差による位置計測方式を利用して、ポインティング装置を開発した。この装置は、近年多様な利用形態に対応できる入力デバイスが必要となったことに応じて開発されたものである。今回実際に装置を試作し、基本的な動作試験を行った。その結果ポインティング装置として十分な性能を有し、実用化の見込が有ることが確認された。

参考文献

- [1] I. Sutherland : A Head-Mounted Three Dimensional Display, *Fall Joint Computer Conference*, pp. 757-764, 1968.
- [2] 野中, 伊達 : 両眼視と運動視を応用したビデオシステム, 計測自動制御学会論文集, Vol.27, No.2, pp. 1144-1151, 1991.
- [3] 野中, 伊達 : 慣性機能を持つポインティング装置の開発, 情報処理学会論文誌, Vol.31, No.2, pp. 268-274, 1990.