

点字ブロックの存在を手のひらに振動で伝達する白杖の研究*

大滝 英 征*¹, 門 井 裕 紀*²
琴 坂 信 哉*¹, 長 坂 保 美*³Study of the White Cane which can be Informed the Condition of
the Pavement Block to the Visually Handicapped Person
Using Linear Vibration ActuatorHideyuki OTAKI*⁴, Hironori KADOI,
Shinya KOTOSAKA and Yasumi NAGASAKA*⁴ Faculty of Engineering, Saitama University,
255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

Bricks and blocks come to be used to the pavement and intersections etc., then a lot of small steps are arisen now, too. On such places it is difficult to find out textured paving block by visually handicapped person using percussion type cane. Therefore the new type white cane is designed which detects the steps condition using ultrasonic sensor installed grip part and draws the attention by the sound. In this research we designed a white cane that had the ancillary function in which it informed to the visually handicapped person's palm whether the block exists or not by the linear vibration actuator (it is called LOA). This cane has a characteristic which detect the color (yellow) of the textured pavement block in addition with the RGB color sensor while providing the function of the percussion typed cane. We made an example for trial purposes and the characteristic was examined. As a result we found that this cane assist the visually handicapped person to find textured paving block.

Key Words: LOA, White Cane, RGB Color Sensor, Textured Paving Block, Visually Handicapped Person

1. ま え が き

現在, 点字ブロックと種類のレンガやブロックが舗道や広場等に敷き詰められることが多くなり, しかも小さな段差も多数生まれている。視覚障害者にとって, このような場所や交差点など不慣れな場所では, 現在の打診式の白杖では点字ブロックの発見が困難な場合もたびたびあり, 晴眼者の補助を必要とすることさえある。そこで, 白杖のつかみ部(グリップ)に超音波センサを取付け, 数歩先の段差状況を検知し, 音や振動で注意を促す機構も考案されてきている。これは段差や物体までの距離を知らせるもので, 点字ブロックの識別は不可能で, 盲導犬といっしょに使用する必要がある⁽¹⁾。これらの欠点を補うため, 点字ブロックが着色されている点に着目し, カラーセンサを石突き部に取付け, 振動で注意を促す機構⁽²⁾も考案されている。しかし, この機構では色の識別帯域が狭く, 路面

に描いた特殊な誘導ラインを検知していく必要がある。現在の雑多な色調の点字ブロックを, 晴・曇天時のみならず, 広告灯等の周囲環境による光の洪水の中でも的確に識別できる機構の開発が望まれる。

本研究では, 介助者を必要とせず, 視覚障害者が自立して, 極力歩行できる白杖の開発を目指す。そのため, 旧来の打診式の機能を持たせながら, さらに点字ブロックをカラーセンサで検知し, リニア振動アクチュエータ(以後 LOA と呼ぶ)によって, 視覚障害者の手のひらに点字ブロックの存在を知らせる補助的機能を備えた白杖を試作した。そして, その使用時等の特性を検討したので報告する。

2. 点字ブロックの存在の検出

2.1 ブロックの色光とカラーセンサ出力値との適合

(1) ブロックの色光 任意の色光は与えられた3原色(赤: R 700 nm, 緑: G 546.1 nm, 青: B 435.8 nm)の強度を調節して等色できる。したがって, カラーセンサの出力値を調整すれば, 点字ブロックの色を判定できることとなる。国際照明委員会(CIE)では, 等色する場合の原色の強度を求め, 等色関数 R, G, B (波長の関数である)を提示している⁽³⁾⁽⁴⁾。これを利用

* 原稿受付 2006年3月29日。

¹ 正員, 埼玉大学大学院理工学研究科(☎ 338-8570 さいたま市桜区下大久保 255)。² 埼玉大学工学部大学院。³ 正員, 日本工業大学(☎ 345-8501 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1)。

E-mail: ohtaki@post.saitama-u.ac.jp

すると、点字ブロックの色と等色させるには R の強度(色刺激値)に負量が必要となる。負量となる部分の色光は、3原色の強度をどのように調節しても等色が不可能である。そこで本研究では、図1に示した CIE による色度 (x, y) と輝度 Y とを利用して評価することとした。馬蹄形をした図の周囲は単色光を意味し、記された数値はその波長である。すべての色(馬蹄形の内部の色)は単色光を混色して得られるので、例えば青と黄の単色光を混色させた場合は、互いの色度 (x, y) を結んだ直線上の色度を有する色光(青と黄の混色割合で決まる)が得られる。その色光と赤の色光を混色させた場合には、同様にして互いの色度 (x, y) を結んだ直線上の色度を有する色光が得られる。例えば(A)のような任意の色光が得られる。したがって、カラーセンサは等色する単色光の3刺激値(感度)が互いに独立で、等色関数の線形結合になっているので、センサの出力を線形変換することにより、点字ブロックの色を認識できることとなる⁽⁶⁾。

(2) カラーセンサの出力値との適合 いま、RGB カラーセンサの分光感度(380~780 nm)を 10 nm 刻みに分割し、行列 $\overline{f_{color}}(1 \times 41)$ で表現し、正規化する。この正規化された 41 次元のベクトル空間の正規直交基底を $\overline{e}_i(i=1 \sim 41)$ とする。センサは RGB の独立した感度を有することから、最初の $\overline{e}_1, \overline{e}_2, \overline{e}_3$ が等色関数の部分空間に対応するものとした。

正規化されたセンサ感度 $\overline{f_{color}}$ は、この正規直交基底で展開すると

$$\overline{f_{color}} = a_{color 1} \overline{e}_1 + a_{color 2} \overline{e}_2 + a_{color 3} \overline{e}_3 + \dots + a_{color 41} \overline{e}_{41}$$

$$a_{color i} = \overline{f_{color}} \cdot \overline{e}_i \dots \dots \dots (1)$$

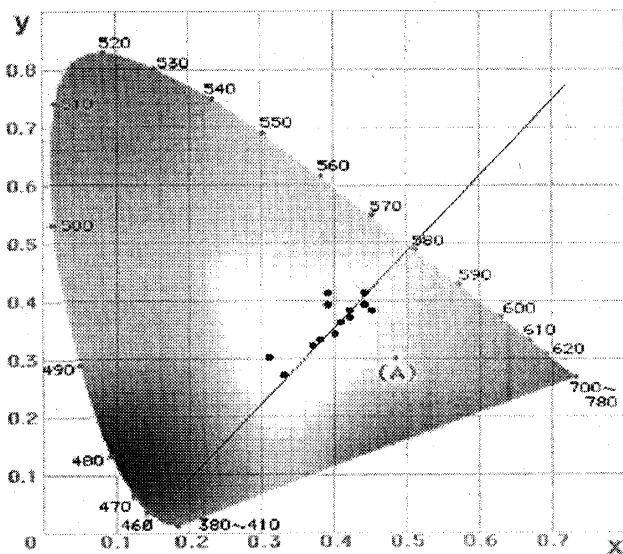


Fig. 1 $x-y$ chromaticity diagram

ここで、等色関数の部分空間を取上げ、その正規直交基底 $\overline{e}_1, \overline{e}_2, \overline{e}_3$ を求める。

$$\overline{f_{color}} = a_{color 1} \overline{e}_1 + a_{color 2} \overline{e}_2 + a_{color 3} \overline{e}_3 \dots \dots \dots (2)$$

いま、等色関数の代表として $\overline{x}, \overline{y}, \overline{z}$ (任意の色光を等色する単色光の刺激値)とした場合、正規直交基底 $\overline{e}_1, \overline{e}_2, \overline{e}_3$ を Gram-Schmidt の直交化法を用いて求めると

$$\overline{e}_1 = \frac{\overline{x}}{|\overline{x}|} \dots \dots \dots (3)$$

$$\overline{e}_2 = \frac{\overline{y} - (\overline{y} \cdot \overline{e}_1) \overline{e}_1}{|\overline{y} - (\overline{y} \cdot \overline{e}_1) \overline{e}_1|} \dots \dots \dots (4)$$

$$\overline{e}_3 = \frac{\overline{z} - (\overline{z} \cdot \overline{e}_1) \overline{e}_1 - (\overline{z} \cdot \overline{e}_2) \overline{e}_2}{|\overline{z} - (\overline{z} \cdot \overline{e}_1) \overline{e}_1 - (\overline{z} \cdot \overline{e}_2) \overline{e}_2|} \dots \dots \dots (5)$$

任意の色光 S に対するセンサ出力は

$$\begin{bmatrix} S_{red} \\ S_{green} \\ S_{blue} \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \overline{f_{red}} \\ \overline{f_{green}} \\ \overline{f_{blue}} \end{bmatrix}$$

$$= S \begin{bmatrix} a_{red 1} & a_{red 2} & a_{red 3} \\ a_{green 1} & a_{green 2} & a_{green 3} \\ a_{blue 1} & a_{blue 2} & a_{blue 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{e}_1 \\ \overline{e}_2 \\ \overline{e}_3 \end{bmatrix} \dots \dots (6)$$

式(3)を式(4)に代入して

$$\overline{e}_2 = -\frac{(\overline{y} \cdot \overline{x})}{k|\overline{x}|^2} \overline{x} + \frac{1}{k} \overline{y} \dots \dots \dots (7)$$

式(7)を式(5)に代入して

$$\overline{e}_3 = \frac{1}{l} \left[\frac{m(\overline{y} \cdot \overline{x})}{k|\overline{x}|^2} - \frac{(\overline{z} \cdot \overline{x})}{|\overline{x}|^2} \right] \overline{x} - \frac{m}{lk} \overline{y} + \frac{1}{l} \overline{z} \dots \dots \dots (8)$$

式(3), (7), (8)を式(6)に代入して

$$\begin{bmatrix} S_{red} \\ S_{green} \\ S_{blue} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{red 1} & b_{red 2} & b_{red 3} \\ b_{green 1} & b_{green 2} & b_{green 3} \\ b_{blue 1} & b_{blue 2} & b_{blue 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S\overline{x} \\ S\overline{y} \\ S\overline{z} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (9)$$

ただし

$$b_{color 1} = \frac{a_{color 1}}{|\overline{x}|} - \frac{a_{color 2}(\overline{y} \cdot \overline{x})}{k|\overline{x}|^2} + \frac{a_{color 3}}{l} \left\{ \frac{m(\overline{y} \cdot \overline{x})}{k|\overline{x}|^2} - \frac{(\overline{z} \cdot \overline{x})}{|\overline{x}|^2} \right\} \dots \dots \dots (10)$$

$$b_{color 2} = \frac{a_{color 2}}{k} - \frac{a_{color 3} m}{kl} \dots \dots \dots (11)$$

$$b_{color 3} = \frac{a_{color 3}}{l} \dots \dots \dots (12)$$

$$k = |\overline{y} - (\overline{y} \cdot \overline{e}_1) \overline{e}_1|$$

$$l = |\overline{z} - (\overline{z} \cdot \overline{e}_1) \overline{e}_1 - (\overline{z} \cdot \overline{e}_2) \overline{e}_2|$$

$$m = \frac{\overline{z} \cdot \overline{y}}{k} - \frac{(\overline{y} \cdot \overline{x})(\overline{z} \cdot \overline{x})}{k|\overline{x}|^2}$$

等色された色光の刺激値 X, Y, Z は

$$X = S\overline{x}$$

$$Y = S\overline{y}$$

$$Z = S\overline{z} \dots \dots \dots (13)$$

であるので、式(11)に代入して、整理すると

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{red1} & b_{red2} & b_{red3} \\ b_{green1} & b_{green2} & b_{green3} \\ b_{blue1} & b_{blue2} & b_{blue3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_{red} \\ S_{green} \\ S_{blue} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (14)$$

これにより、センサ出力 S_{red} , S_{green} , S_{blue} から任意光の X, Y, Z への変換ができることとなる。式(14)より色度 $x = X/(X+Y+Z)$, $y = Y/(X+Y+Z)$ を求め、 $x-y$ 色度図上に対応する色光として記載することができる。

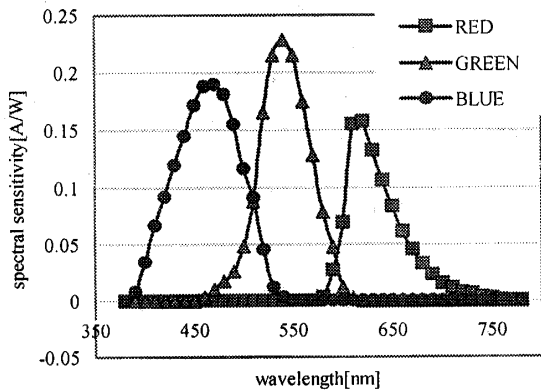


Fig. 2 Spectral sensitivity curve of R, G, B sensor

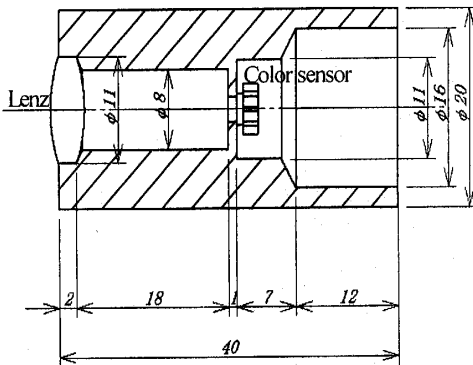
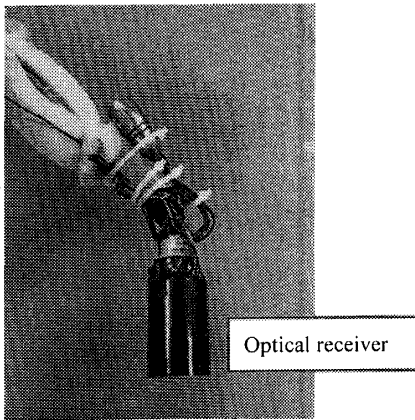


Fig. 3 Optical receiver

使用したセンサのカatalogによると、センサ感度特性は図2のようである。これより黄色の単色光(500 nm)における R, G, B の刺激値(感度) $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ を求め、式(14)に代入すると

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9.9018 & 2.1794 & 1.4369 \\ 4.8371 & 5.2472 & 0.1981 \\ 1.4368 & -1.2442 & 8.6925 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{red} \\ S_{green} \\ S_{blue} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (15)$$

が得られる。

2・2 ブロックの色検知部の構成

2・2・1 受光部 図3に受光部を示した。視覚障害者は、白杖で1歩以上先の状況を検知することを心掛けている。そこで、本杖では1歩幅先でセンサ受光部が地面と垂直になるように、センサ受光部の地面に対する傾斜角(60 deg)を設定した。RGBカラーセンサだけでは色識別を行う光量が十分には得られないため、集光用レンズを組込んだ。また、廊下など照明機器の照明だけでは光量が不足気味となる箇所では、レンズの両脇部に取付けた白色LEDで点字ブロックを照射し、光量を補完することとした。

また、周辺環境の輝度を検出して天候状況等を判断し、それに応じて適切に点字ブロックの色度を把握できるよう、同一のRGBカラーセンサを同位置で上向きにも取付けた。

なお、本装置では路面を強打診した場合、石突き部の強度はまだ不足気味であり、センサカバーを厚くするなどの措置が必要である。

2・2・2 動作回路 図4は色識別用の回路を示したものであり、反転増幅回路とローパスフィルタで構成した。センサの光電流をI-V変換回路によって電圧出力に変換する。この場合、センサからの光電流と

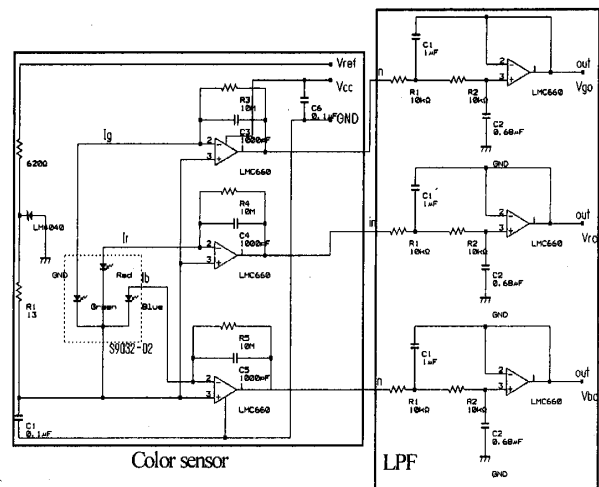


Fig. 4 Color identification circuit

I-V 変換された出力電圧の関係は、式(16)で表される。

$$\begin{aligned} V_{ro} &= V_{os} - I_r R_4 \\ V_{go} &= V_{os} - I_g R_3 \\ V_{bo} &= V_{os} - I_h R_5 \dots\dots\dots (16) \\ V_{os} &= V_{REF} \pm 5 \text{ mV} \end{aligned}$$

V_{REF} : レファレンス電圧 5.00 V

V_{ro}, V_{go}, V_{bo} : 赤, 緑, 青色の出力

I_r, I_g, I_h : 赤, 緑, 青色の光電流

また、ローパスフィルタは、室内の照明具より派生する 50 Hz の帯域の雑音をカットするために組込んだ。今回使用したフィルタは正帰還形アクティブフィルタで、OP アンプ一つで作成可能である。

2.3 点字ブロック識別のためのしきい値 本装置の使用時の周辺環境は、屋外晴天時(日陰も含む)、屋外曇天時、室内の蛍光灯照明状況下、光量不足下(主に夜間)である。この状況下では、色度測定時にホワイトバランスを逐一とる必要がなかった。輝度は上向きに取付けたセンサで測定し、どの環境下にいるかを判別した。白杖は、点字ブロック面に対して 60° の傾きを持たせ、表面から 10 cm 程度離れた位置で左右に振って出力の最大値を求めた。色度の分布例は図 1 中に黒点で示したが、かなりのばらつきを生じる。そこで、各条件下での測定値にしきい値を求め、点字ブロックの存在判定に信頼性を持たせることとした。図 5 は測定された色度についての頻度分布例を示したものである。この頻度分布を正規分布とみなした場合の正規分布曲線も併記してある。平均値 μ 、標準偏差 σ とした場合、 $\mu \pm 2\sigma$ までとると確率的には 97% 近くがその範囲中に含まれることになる。したがって、色度のしきい値を $a = \mu - 2\sigma$ 、 $b = \mu + 2\sigma$ とすれば、その物体を点字ブロックと判断できるものと考えた。この

ような実験を日時、場所を変えて行い、その都度しきい値を求めた。それらの値のうち最小値を a_{min} 、最大値を b_{max} とし、改めて色度のしきい値とした。表 1 は、このしきい値を $a_{min} \leq x, y \leq b_{max}$ の形で整理したものである。表中には輝度についても、同様にして求めたしきい値を示してある。加えて、色度測定用のカラーセンサの出力値から求めた値も併記した。輝度は室内外の違い、天候の違いで明確な差異が見られる。そこで、測定値の最大値、最小値に注目し、輝度による環境の判断は以下のように行うものとした。

$Y > 5.00$ の輝度るとき：晴天と判断する。

$2.45 < Y$ の輝度るとき：室内と判断する。

$5 > Y > 2.45$ の輝度るとき：曇天と判断する。

3. 手のひらへのアクチュエータによる振動伝達

3.1 手のひらに与える最適な刺激の大きさ 点字ブロックの存在の有無の情報は、手のひらに振動形態で提供する。手のひらの触覚受容器の分布密度と空間分解能⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾を検討した報告によると、4 種類 [FAI 受容器(マイスナー小体), SAI 受容器(メルケル小体), FA II 受容器(パーチニ小体), SA II 受容器(ルフィニ小体)] の異なる性質を持った触覚受容器が存在する。この中で振動や凹凸等の空間的情報の検出・処理を主に行うのが FAI 受容器で、手のひら全体にわたって分布している。特に指先の分布密度は高く、振動刺激を与えた場合の感度特性では、発火振動数が 10 Hz 程度である。本装置でのアクチュエータは人差し指、中指、薬指の先端部分をそれぞれ刺激するように配置し、15 Hz を加えることとした。

3.2 アクチュエータの動作特性 図 6 は、振動

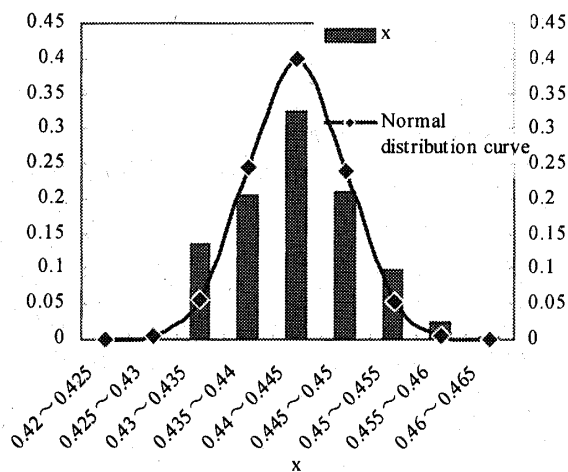


Fig. 5 Frequent distribution at fine weather

Table 1 Threshold of $x-y$

	x	y	Ground Y	Illumination Y
Fine weather	0.430	0.330	2	5
	$\leq x < 0.490$	$\leq y < 0.370$	14	30
Cloudy	0.41	0.31	0.35	1
	$\leq x < 0.47$	$\leq y < 0.38$	2.00	7
Indoor	0.360	0.325	0.200	0.45
	$\leq x < 0.41$	$\leq y < 0.355$	0.700	$< Y \leq 2.45$

を発生させるリニア振動アクチュエータ機構 (LOA)⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ を示したものである。LOA の鉄心部 (刺激子) は、希土類永久磁石と継鉄とをつなぎ合わせたものとし、磁束密度の大きい位置 (コイルの端部近傍) に永久磁石部を配置した構造とした ($N: 1850 \text{ turn}$, $H_{mag}: 8.5 \times 10^6 / 4\pi \text{ [AT/m]}$)。このアクチュエータを 3 個グリップ部に埋め込み、さらに刺激子の脱落防止とグリップの握りやすさを考慮し、ゴムシートで覆った。LOA には $\pm 12 \text{ V}$ の矩形波を on-off 形式で印加する。したがって、刺激する指先の差異による 3 種の情報と、その on-off に関する 2 種の情報、計 6 種の情報を提供できる構成となっている。

図 7 はアクチュエータの駆動回路を示したものであ

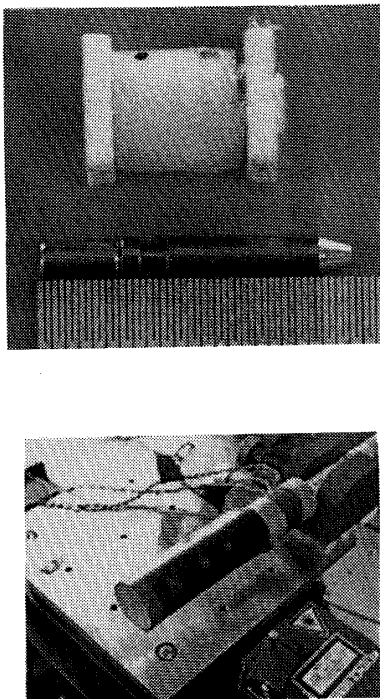


Fig. 6 Linear oscillatory actuator

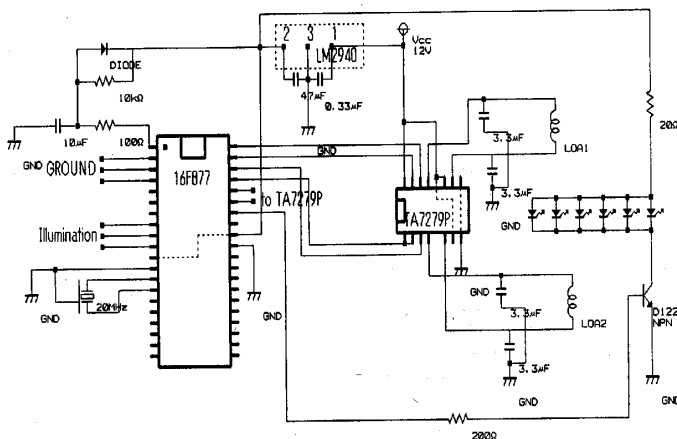


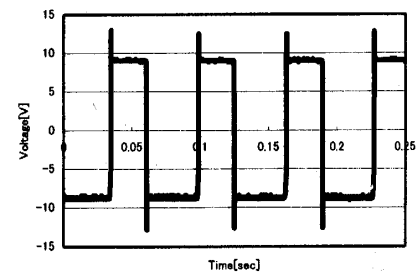
Fig. 7 Control circuit

る。カラーセンサの出力値を PIC16F877 を用いて A/D 変換し、表 1 に示した輝度のしきい値に従って、天候状況等を区別する。そして、その状況に合わせて点字ブロックの有無を判断する。したがって、計 6 種類の出力を LOA に印加する構成となっている。

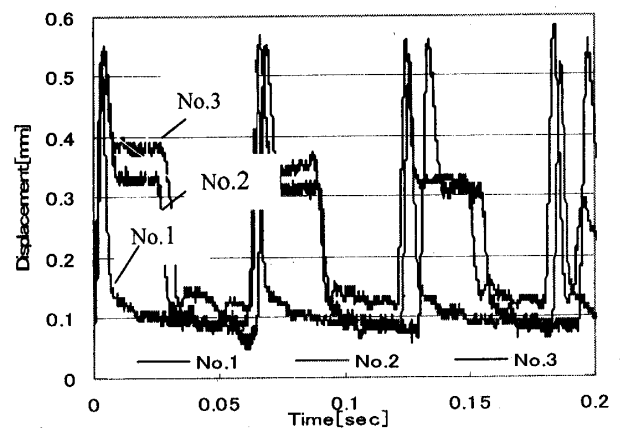
3・3 刺激子による刺激伝達 図 8 は、3 個のアクチュエータに図 8(a) に示したような電圧を印加した場合について、レーザ変位計で測定した各刺激子の振動波形を示したものである。アクチュエータによって、応答の状況が若干異なるが、印加初期の突起状の波形は刺激子が突出した瞬間によるものである。続く波形はゴムシート残留振動によるものである。ゴムシートを介しているものの、入力電圧の周波数とほぼ同じ周波数の振動が得られ、応答性は比較的良好ことがわかる。

入力波形の正負切換え時に見られる鋭い突起は、鉄心部を飛び出させたり、引き戻すのに必要とする磁界を瞬時に発生させるための電圧と考えられるが、この波形のありようについては今後の検討課題である。

3・4 刺激子による刺激伝達 指先に分布する FAI を刺激する場合、どのように刺激子を配列すれば、情報伝達が確実なものとなるかを実験的に検証し



(a)



(b)

Fig. 8 Wave occurred at the grip part by stimulant devices

た。指先刺激用として、グリップ部に縦列に 20 mm 間隔で 3 箇所の刺激部 (No. 1, No. 2, No. 3) を設けた。実験では、三つの刺激子をランダムに振動させ、目隠しをした被験者 (10 人) にどの刺激子が振動したかを答えてもらう形式で行った。実験結果では、正答率 98.7% で、指の受容器を発火するには適切な配置および変位量であると判定される。

4. 触刺激白杖の使用実験

4.1 白杖の動作制御 図 9 は制御のフローチャートを示したものである。

- (1) センサ出力値から式 (15) を用いて、地表面の輝度を測定する。
- (2) 得られた輝度から現在どの状況下 (晴天, 曇

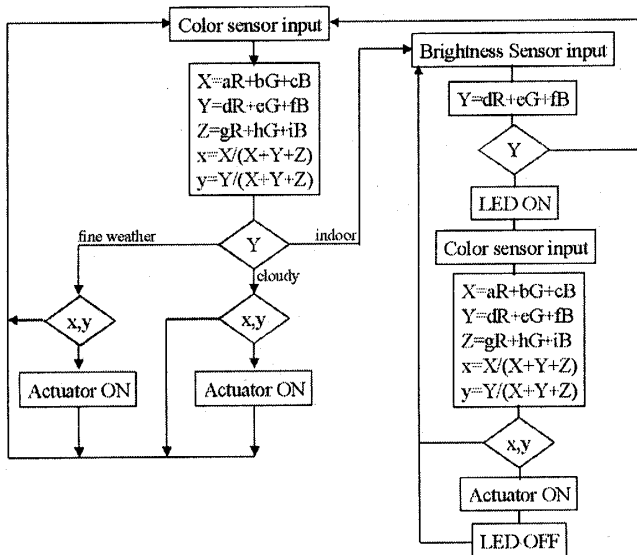


Fig. 9 Flowchart of the cane when is used in the outdoor and indoor

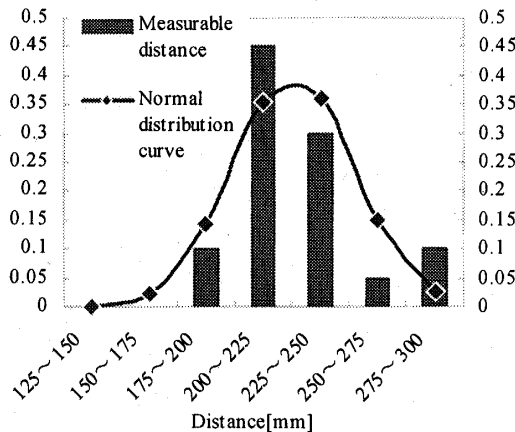


Fig. 10 Probability of the measurable distance from the optical receiver to the ground surface

天, 室内) にあるか, LED による照明が必要かを判断する。光量不足と判断した場合は, LED 補助照明を点灯する。

(3) 判断した状況下にあるとして, 測定したカラーセンサ出力から地表面の色度 x, y を算出し, 表 1 に示したしきい値で点字ブロックの有無を判断する。

(4) 有り判定した場合には, グリップ部のアクチュエータに $\pm 12\text{ V}$, 15 Hz を印加し, 駆動する。

4.2 石突き部と地面との距離 試作した白杖の

石突き部を上下方向に移動した場合, ブロックの存在を安定的に判定できる距離を検討した。周辺環境を屋外晴天時, 曇天時, 夜間, 室内の蛍光灯照明状況下として, グリップでの振動状況が把握しにくくなる距離 x を測定した。図 10 は複数回測定 (晴天時) し, その頻度分布を示したものである。得られた頻度分布を正規分布とみなし, 平均値 μ , 標準偏差 σ とした場合, $x > \mu - 3\sigma$ の距離 ($x > 125\text{ mm}$) では, 確率的にほぼ 99% 近くがブロックの存在の判定が不安定となる。この結果から, 石付き部と地面との距離を 125 mm 以下にするようにして歩行する必要がある。他の場合も同様にして求め, 表 2 に示した。表 2 から, どのような環境下でもほぼ 80 mm の距離を保って歩行すれば, 点字ブロックを見失うことはないといえる。

Table 2 Maximum distance from the optical receiver to the ground surface

	Fine weather	Cloudy	Indoor
Distance [mm]	125	140	80

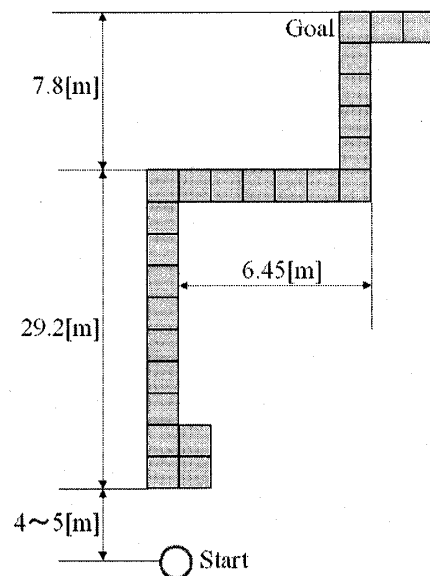


Fig. 11 Rout for the examination

4・3 触刺激白杖の使用実験 本実験では、市街地に既設の点字ブロックを対象に行った。経年劣化や表面に汚れも付着しており、一般的なものである。図11はそのコースを示したもので、日陰や日当たり箇所が点在している。全長約35mで、途中2箇所折れ曲がりがある。被験者は目隠しをし、点字ブロックの配列地点から手前約4m離れた点から任意方向に歩行を開始する。点字ブロックを発見し、目的地まで到達できる確率を調査した。被験者5名全員が点字ブロックを発見でき、そのうち4名が目的地までたどりつくことができた。所要時間は40～60秒程度であった。到着できなかった者は、点字ブロックの発見はできていても、日陰と日向が複雑に混在する場所でセンサが誤判別することがあり、実験者がブロック発見に戸惑うことがあった。この対処として、色測定用カラーセンサで輝度と色度を測定すると、安定的な判断が可能とはなったが、乾いた泥で汚れたアスファルトを曇天下での点字ブロックと誤判断してしまうこともあった。このようなことから、点字ブロックの経年劣化や表面の汚れ、濡れと日陰、日当たりが輻輳した場合に対するさらなる対策は今後の課題となる。

しかし、上記実験では概して、点字ブロックの色度が表1の範囲に入っていたことを意味し、本白杖の有効性が実証されたともいえる。

5. ま と め

本研究では、点字ブロックの存在を識別し、その有無を触刺激情報として視覚障害者に伝える新たな電子

白杖を製作した。その結果

- (1) カラーセンサによる点字ブロックの色識別手法は有効であることが実証できた。
- (2) リニア振動アクチュエータを用いた触刺激による情報伝達の確実性を実証できた。
- (3) 地上から多少離れても安定的に動作し、点字ブロックの発見が行われることを実証した。

本白杖は点字ブロックの発見の補助、および誘導の補助を行うには有効であることが確認できた。

文 献

- (1) Nittento Co, Virtual milometer using supersonic wave, <http://www.nittento.or.jp>
- (2) Tanaka, N., *Visually handicapped person guide system and device*, Pat. No. 2005-296570 (2005).
- (3) Tazima, J., *Theory of the restoring collard pictures*, (1996), p. 17, Maruzen.
- (4) Miura, Y., *Analysis of the disital pictures*, (2000), p. 55, University of Tokyo Press.
- (5) p. 60 of (3).
- (6) Shirado, N., *Journal of the Surface Science Society of Japan*, Vol. 41, No. 5 (2003), pp. 145-152.
- (7) Maeno, T., *The Robotics Society of Japan*, Vol. 18, No. 6 (2000), pp. 772-775.
- (8) Shinohara, M., *News of National Institute of Bioscience and Human Technology*, Vol. 8, No. 5 (2000), p. 2. (<http://www.aist.go.jp/NIBH/>)
- (9) The Institute of Electrical Engineers magnetic actuator investigation technical committee, *Linear Motor and its application*, (1987), p. 23, The institute of Electrical Engineers of Japan.
- (10) Yamada, H., *Linear motor and applied technology*, (1976), p. 68, Jikkoyousyuppan.