

カベクトル分布センサの最適設計

最適化規範の提案と光学式触覚センサ設計への適用

梶本 裕之*

Optimal Design Criterion for Force Vector Field Sensor

Proposal of Optimization Criterion and Its Application to the Design of Optical Tactile Sensor

Hiroyuki Kajimoto*

To design a tactile sensor that can measure direction and distribution of force, common strategy is to add a mechanical tab on top of four sensing elements. The tab translates force direction information to the sum and difference of the elements' output. However, quantitative criteria for the evaluation of the sensor has not been proposed. In this paper, we propose to use singular value decomposition (SVD) to measure S/N ratio and gain at the same time. We also applied the proposed criteria to optimally design the reflector pattern of the optical type tactile sensor.

Key Words: Tactile Sensor, Optimal Design, Singular Value Decomposition, Optical Tactile Sensor

1. はじめに

近年ロボットハンドやユーザインタフェースの表面で、力の方向も含めた力分布を計測したいという欲求が高まっている。多自由度の分布力を計測できれば、接触状態をより正確に把握できるためである [1]。

商用の力分布センサの多くは面に対して法線方向の力分布のみ計測する。力の方向も計測するには、複数個 (多くは4つ) の力センサを1単位として扱い、それらにまたがるレバー機構を用意するのが最も一般的である [2]~[4]。レバーによって接線方向の力が法線方向に変換され、各センサエレメントの出力の和と差からカベクトルを算出できる。

典型的な構造の例を Fig.1 に示す。鉛直方向を z 軸、面を xy 平面とすると、レバー先端に加わる力は F_x, F_y, F_z の3要素であり、センサの出力は O_A, O_B, O_C, O_D の4つである。このとき4出力の合計、および差分

$$O_A + O_B + O_C + O_D \quad (1)$$

$$(O_A + O_B) - (O_C + O_D) \quad (2)$$

$$(O_A + O_C) - (O_B + O_D) \quad (3)$$

は垂直抗力 F_z 、および接線成分 F_x, F_y に比例する。

以上は力分布センサに簡単な機構を付け加えることでカベクトル分布センサとして用いるための一般的な手法である。各セ

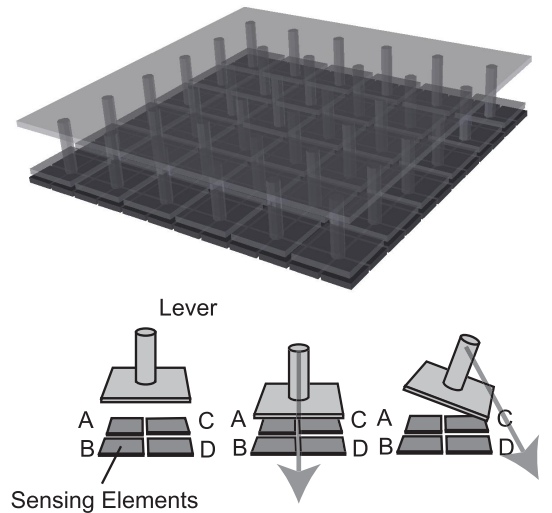


Fig. 1 Typical tactile sensor to measure normal and tangential force distribution.

ンサエレメントが取得する物理量としては、静電容量、電気抵抗、光、超音波等が用いられる。

本手法の適用例は多い。しかし多くの研究は各センサエレメントの力検出方式のバリエーションに関するものであり、実測以外のセンサ性能の評価としては、有限要素解析等による弾性体の変形シミュレーションにとどまっている。

つまりセンサの良さを定量化する規範が曖昧であったように思われる。またこのため、例えば構造力学における位相最適化 [12] のように設計段階で構造を自動的に最適化する試みも少なく、

原稿受付

*電気通信大学

*University of Electro-Communications

ヒューリスティックな設計にとどまっている．本稿はこの状況に対して，

- (1) カベクトル分布センサ評価の枠組みを与えること
- (2) 提案した枠組みを利用して最適解を具体的に得る手順を例示すること

を目的とする．

一般に複数入力，複数出力のセンシングシステムにおいて入出力関係が行列で表せるとき，センサの能力を行列の特異値分解によって評価する手法が一般的である．触覚・力覚センサにおいても，多軸力センサで特異値分解を用いた評価手法が提案されている [10]．また力分布センサにおいても，特異値分解を用いた特徴量抽出が提案されている [11]．

本稿はまず力分布を方向も含めて計測する際の同様な評価の枠組みを与える．さらに提案した手法の検証として，特に変位検出に光学素子を用いた状況を例に取ってセンサ構造の最適設計を試み，妥当な最適解が自動的に得られることを示す．

2. 最適化規範の提案

一般に力の方向も計測する力分布センサは次のことを行う．

まずカベクトル分布が入力される．計測点が N 個の場合，力の成分が 3 要素であれば

$$\mathbf{F} = [F_{x1}, F_{y1}, F_{z1}, F_{x2}, F_{y2}, F_{z2}, \dots, F_{xN}, F_{yN}, F_{zN}] \quad (4)$$

なる $3N$ 個の要素からなるベクトルが入力となる．

次に各センシングエレメントからの出力が観測される．例えば各計測点が 4 つのセンサエレメントで構成される場合，

$$\mathbf{O} = [O_{A1}, O_{B1}, O_{C1}, O_{D1}, \dots, O_{BN}, O_{CN}, O_{DN}] \quad (5)$$

なる $4N$ 個の要素からなるベクトルが出力となる．

弾性体とセンサ出力の線形性が仮定できれば，力 \mathbf{F} と出力 \mathbf{O} の関係はある行列 \mathbf{H} によって

$$\mathbf{O} = \mathbf{H}\mathbf{F} \quad (6)$$

と記述される．

結局表面に加わる力は， $\mathbf{F} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{O}$ という逆問題を解くことによって，方向も含めて計測される． \mathbf{H}^{-1} は一般には擬似逆行列となる．

センサの性能は行列 \mathbf{H} によって決定される．よってセンサの設計とは，行列 \mathbf{H} の設計に他ならない．本稿の第一の目的はセンサの「良さ」を定量化する枠組みを与えることであるが，これは行列 \mathbf{H} の良さを定義するということである．

行列 \mathbf{H} の良さを次の 2 点から定義する．第一に観測される出力ベクトル \mathbf{O} に含まれる，測定したいカベクトル \mathbf{F} の各成分の独立性である．独立性が高いほど入出力間のクロストークが小さくなる．クロストークは逆行列 \mathbf{H}^{-1} によって解消されるものであるが，センサの S/N 比の悪化につながる．これに関しては行列 \mathbf{H} の特異値の最大値と最小値の比が 1 に近いほど独立性が保証されることが知られており，例えば多軸力センサの評価に用いられている [10]．

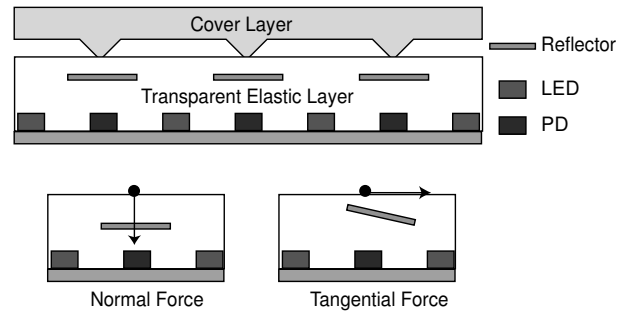


Fig. 2 Optical tactile sensor for case study.

第二にセンサそのものの敏感さ，すなわちゲインである．これには特異値の平均値を用いることが出来る．

結局，独立性とゲインを共に考慮した行列の良さの指標として次の評価基準を選ぶ．

$$\text{score} = \frac{\min(\sigma)}{\max(\sigma)} \text{mean}(\sigma) \quad (7)$$

σ は行列 \mathbf{H} の特異値の集合を表す． \min ， \max ， mean はそれぞれ最小，最大，平均を表す．式から明らかなように，第一項で独立性を，第二項でゲインを評価している．本稿では最も単純に二つの項を掛けたものを用いる．

3. 光学式触覚センサによる検証

以後，提案した規範を具体的な例に適用することにより，提案の合理性を検証すると共に，センサ設計の最適化が可能であることを示す．検証においては Fig.2 に示すような光学式の触覚センサを考える．複数の発光素子 (LED) と受光素子 (PD) の配列上に透明弾性体層を乗せ，さらに弾性体カバーを被せる．弾性体カバー底面には凹凸がつけられ，力の作用点を限定する役割を果たす．透明弾性体内部には反射板が埋められている．各 LED の発光時刻を変える等の工夫により，一つの PD は隣り合った複数の LED から発せられた光の反射を個別に観察することが出来る．力の向きによって反射板の変位，傾きが変わるため，隣り合った LED からの反射光の和と差をとることにより法線，接線方向の力を独立に計測出来る．変位検出に光学素子を用いることには機械的な接触，衝撃に対して頑強な触覚センサを作成可能であるという利点がある [3] ~ [8]．

以下ではこの光学式触覚センサの反射板形状を最適化するという目的に対して，提案した最適化規範を用いる．

3.1 1 要素による検証

まず LED 二つの中央に PD が一つ配置されたもっとも簡単な 2 次元断面の状況を考える．センサの面方向を x 軸，面に対して垂直な方向を y 軸にとる．PD の位置を原点とする．

センサの目的は，表面に加わる力の法線，接線成分を独立に検出することである．我々センサ設計者の目的は，最適な反射板形状を求めることである．

3.1.1 光の反射による計測の定式化

弾性体層は均一の等方弾性体とする．弾性体の厚みを D ，LED と PD の間隔を $d/2$ とする．

もっとも自由度の高い反射面の形態は，任意の関数 $y=f(x)$ で

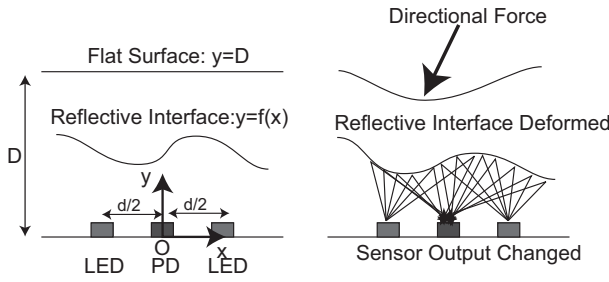


Fig. 3 General reflective interface for optical tactile sensor.

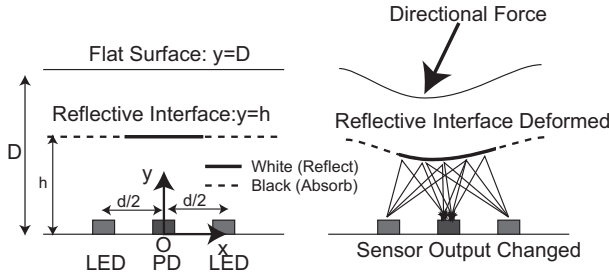


Fig. 4 Flat reflective interface for optical tactile sensor.

表される反射面であろう (Fig.3) . しかし製造の容易さ, 特に反射面は印刷によって作成するのがもっとも効率的であることを考えると, 次のような制限を設けることが現実的と思われる (Fig.4) .

- (1) 反射面の高さは一定 . $y = h$
 - (2) 反射面は「反射 (白)」と「吸収 (黒)」の 2 値をとる .
- 以上の設定のもとで, 光の反射による力計測の定式化を行う . まず反射面の x 座標を離散化する .

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N] \quad (8)$$

離散化された N 個の反射面を以後反射素片と呼ぶ . 反射面の状態は, この N 個の反射素片がそれぞれ「反射 (白)」か「吸収 (黒)」のいずれをとるかで決まるから, 可能な状態の総数は 2^N 通りとなる . この状態を次のようにベクトル表記しておく . 以後これを反射板パターンベクトルと呼ぶ .

$$\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_N] \quad (9)$$

where

$$P_i = \begin{cases} 0 & (\text{absorb}) \\ 1 & (\text{reflect}) \end{cases} \quad (10)$$

一つの LED を点灯した際の, 各反射素片で反射して PD に至る光の強さを計算する (Fig.5) . ここでは簡単な反射特性として CG 等で多用される diffuse surface を仮定し, 反射素片からの反射光量は素片の法線ベクトルと入射光ベクトルの内積で表されるものとする . なお LED, PD 自体の指向性は本稿では考えない .

$$L_i = (\mathbf{N} \cdot \mathbf{I}) \cdot S/A \quad (11)$$

ただし L_i は i 番目の反射素片によって PD に入射する光量, N ,

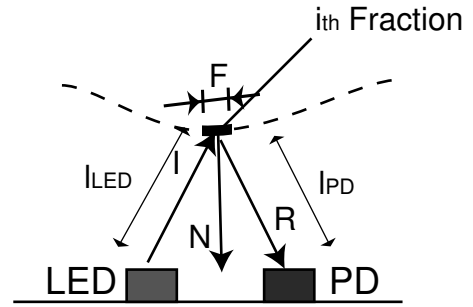


Fig. 5 Optical pathway from LED to PD via reflective fraction.

\mathbf{I} は反射素片の法線ベクトル, および LED から反射素片への入射光ベクトルで, S は次の式で表される反射素片の面積の PD に対する射影量, A は距離による減衰項である .

$$S = F \cdot (\mathbf{N} \cdot \mathbf{R}) \quad (12)$$

$$A = L_{LED} \cdot L_{PD} \quad (13)$$

ただし, F は反射素片の大きさ, R は反射素片から PD への反射光ベクトル, L_{LED}, L_{PD} は LED から反射素片への距離, および反射素片から PD への距離である . 2 次元断面を考えているので距離による減衰は距離に反比例している . 反射素片同士の干渉 (遮蔽) は無視する .

PD 直上のセンサ表面から法線 (y 軸) 方向に単位力を加え, このときの反射面の変形を計算する . 反射面上の各点 $[x_i, y_i]$ が, $[dx_i, dy_i]$ だけ移動したとする .

$$[x'_i, y'_i] = [x_i + dx_i, y_i + dy_i] \quad (14)$$

今回は簡単のため, 半無限大弾性体に対する理論式を用いて変形の計算を行った [9] . 一般の場合には有限要素法等によるシミュレーションを用いることになる . 変形を計算した上で再度式 (11)-式 (13) によって反射光強度を求め, L'_{iy} とする (添字 y は力を加えた方向を表す)

センサとして得られる意味のある出力は, 力を加えていない定常状態と力を加えたときとの差である (反射光の差分のみ出力する回路は容易に作成可能である . 概念的な回路図を Fig.6 に示す . LED は電流制御され, PD (図ではホトトランジスタ) の出力はあるオフセット電圧を差し引かれて増幅される) . これを dL_{iy} とする (添え字の i は i 番目の反射素片であること, y は法線方向に力を加えた際の変化であることを示す) . すなわち

$$dL_{iy} = L'_{iy} - L_i \quad (15)$$

同様に接線 (x 軸) 方向に単位力を加えることにより dL_{ix} を得る .

各反射素片からの反射光量変化をベクトル表記する .

$$d\mathbf{L}_x = [dL_{1x}, dL_{2x}, \dots, dL_{Nx}] \quad (16)$$

$$d\mathbf{L}_y = [dL_{1y}, dL_{2y}, \dots, dL_{Ny}] \quad (17)$$

さて, ある反射面パターン \mathbf{P} が与えられたときの出力を求め

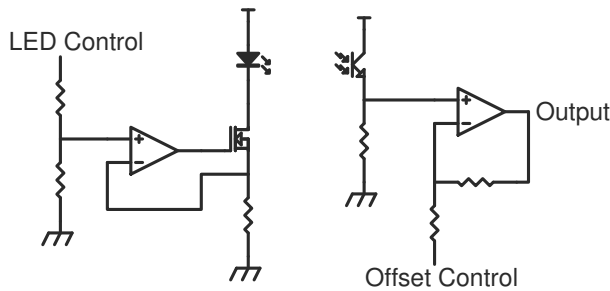


Fig. 6 Schematic diagram of LED and photo transistor driver.

る．これは全ての反射素片からの反射光の合計である．法線，接線方向に単位力を加えたときの出力をそれぞれ R_x, R_y とすると，これらは反射板パターンベクトル \mathbf{P} と反射光量変化ベクトルの内積で表される．

$$R_y = \mathbf{P} \cdot d\mathbf{L}_y \quad (18)$$

$$R_x = \mathbf{P} \cdot d\mathbf{L}_x \quad (19)$$

左右の LED それぞれに対する出力を計算し，それぞれ $R_{xL}, R_{yL}, R_{xR}, R_{yR}$ とする．添字 R, L は LED の左右を表す．前述のように時分割点灯により一方の LED に由来する反射光を分離して取得可能である．

弾性体の線形性を仮定すれば，任意の力 $\mathbf{F} = [F_x, F_y]^T$ を加え，各 LED を点灯させた際の出力 O_L, O_R は次の式で与えられる．

$$\begin{bmatrix} O_L \\ O_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{xL} & R_{yL} \\ R_{xR} & R_{yR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad (20)$$

以上により，入力力ベクトルと出力光量との間を結ぶ行列 \mathbf{H} を求めることが出来た．

3.1.2 反射板パターンの最適化

シミュレーション実験によって最適な反射板パターンを求めることで，提案した最適化規範が妥当であることを示す．

LED と PD の距離 $d/2$ を 1 に規格化し，他の距離パラメータを $d/2$ に対する相対値で表す．弾性体の厚み $D = 2$ ，反射面の高さ $h = 1$ とし，反射面を -2 から 2 まで， 0.25 刻みで離散化して反射板パターンベクトルとした．反射板パターンベクトルの要素数は 17 だから，必要な全探索回数は 2^{17} ，すなわち 131072 回である．全ての場合に対して行列 \mathbf{H} を計算し，第 2 章で提案した行列の良さ”score”を求め，最も高い score を与える行列 \mathbf{H} と，それを与える反射板パターンベクトルを求めた．

膨大な場合の数に対して評価を行うため計算量の問題が心配されるが，実際には探索回数分を行わなければならない操作は反射板パターンベクトル \mathbf{P} と反射光量変化ベクトルの内積により出力 R_x, R_y を求める部分以降に限られる．これは各反射素片からの寄与が式 (18)，式 (19) のように線形に表せるためである．シミュレーションを必要とする計算 (式 (11)-式 (17)) は初回のみであり，最適化計算全体からみて全く負荷とならない．このため探索空間を全探索することが可能となる．

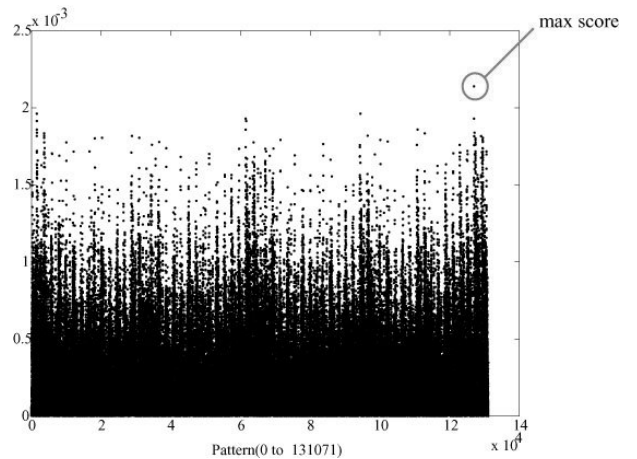


Fig. 7 Scores of all reflector pattern. Circle indicates maximum score

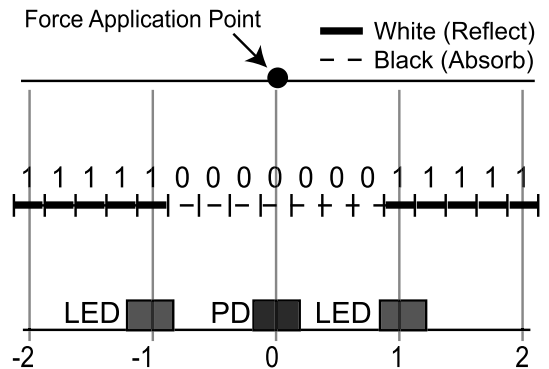


Fig. 8 Optimal reflector pattern for optical tactile sensor.

3.1.3 実験結果

全 131072 回の score を Fig.7 に示す．最適な反射板パターンベクトル \mathbf{P} は，

$$\mathbf{P} = [1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1]$$

となった．この反射板形状を Fig.8 に示す．このとき行列 \mathbf{H} は

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} -0.902 & 1.0 \\ 0.902 & 1.0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

となり (行列内の最大要素で正規化した)，特異値の最小値と最大値の比は 0.9018 となった．二つのセンサ出力からカベクトルを求めるには \mathbf{H} の逆行列を用いれば良く，結局

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.55 & 0.55 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} O_L \\ O_R \end{bmatrix} \quad (22)$$

として求めることが出来る．

\mathbf{H} の逆行列により，法線，接線方向の力成分が反射光の和と差によって得られていることが分かる．これは従来から提案されてきたカベクトル分布型触覚センサの原理と一致するものであり，提案した最適化規範によって妥当な解を探索し得ることが示されたといえる．

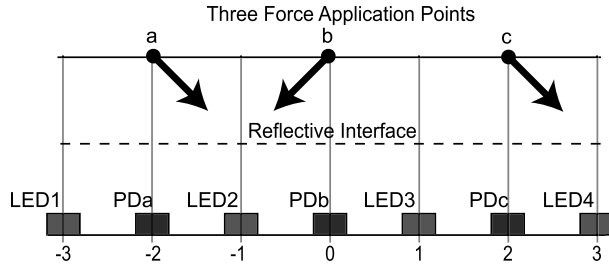


Fig. 9 Distributed optical tactile sensor.

3.2 複数要素の場合の検証

次に計測点が複数ある場合にも同様の規範が有効であることを示す．今回は計測点が3箇所ある場合を考える (Fig.9)．LED4つを $x = [-3, -1, 1, 3]$ の位置に配置し, PD3つを各LEDの中間に配置する．LED4つをLED1, LED2, LED3, LED4と呼ぶ．LEDを時分割で点灯させることにより, 各LEDからPDへの反射光は分離して取得可能である．

PDの直上に計測点を3点設け, 点a, b, cとする．対応するPD3つをPD_a, PD_b, PD_cと呼ぶ．PD_bが原点となる．それぞれの点で法線, 接線方向の力を計測するから, 未知の力ベクトルの要素数は6となる．各PDの隣りのLEDからの光のみを考慮して, センサの出力数も6となる．

最適解を求めるアルゴリズムは前回と全く同様である．ただし実際に考えたいのは, LED, PDが無限に繰り返すマトリクスである．よって $x = [0 : 2]$ の範囲のパターンが, $x = [-2 : 0]$, $x = [2 : 4]$, $x = [-4 : -2]$, でも繰り返さなければならない．よって探索すべきは $x = [0 : 2]$ の最適パターンであり, この仮定によって探索空間を狭めることができる．

点a, b, cに単位力が加わったときの各PDの応答を計算する．点aにx方向単位力が加わったときの, LED1からの光によるPD_aの受光量を R_{ax1a} とする．同様に合計36通りの組み合わせを計算することにより, 次のような関係が得られる．

$$\begin{bmatrix} O_{a1} \\ O_{a2} \\ O_{b2} \\ O_{b3} \\ O_{c3} \\ O_{c4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ax1a} & R_{ay1a} & \cdots & R_{cy1a} \\ R_{ax2a} & R_{ay2a} & \cdots & R_{cy2a} \\ R_{ax2b} & R_{ay2b} & \cdots & R_{cy2b} \\ R_{ax3a} & R_{ay3a} & \cdots & R_{cy3a} \\ R_{ax3b} & R_{ay3b} & \cdots & R_{cy3b} \\ R_{ax4a} & R_{ay4a} & \cdots & R_{cy4a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{ax} \\ F_{ay} \\ F_{bx} \\ F_{by} \\ F_{cx} \\ F_{cy} \end{bmatrix} \quad (23)$$

ただし O_{a1} はLED1からの光によるPD_aの受光量を表す．

今回は $x = [-4 : 4]$ の範囲を最適化した．前述のように $x = [0 : 2]$ のパターンを繰り返すことを前提とする．0.125間隔で16bit, 65536通りのパターンに対して全探索を行い, 最適なパターンを得た．

最適パターンPは,

$$P = [1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1]$$

となった．このパターンを $x = [-4 : 4]$ で繰り返して得られた実際の反射層の様子を Fig.10 に示す．

このときH行列は

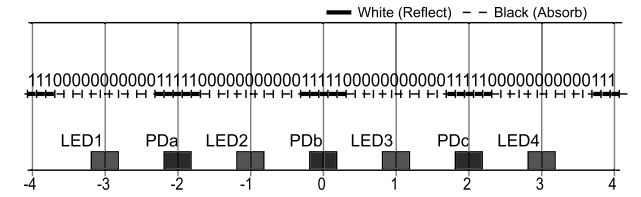


Fig. 10 Optimal reflector pattern for distributed optical tactile sensor.

0.030	1	-0.349	0.138	-0.220	0.040
-0.138	0.978	0.698	-0.109	0.180	0.010
-0.713	-0.107	0.116	0.971	-0.304	0.133
0.304	0.133	-0.116	0.971	0.713	-0.107
-0.180	0.010	-0.698	-0.109	0.138	0.978
0.221	0.040	0.349	0.138	-0.030	1

となり (行列内の最大値で正規化), 特異値の最小値と最大値の比は0.3089となった．

3.3 考察

3.3.1 1要素の場合

法線, 接線方向の力成分が反射光の和と差によって得られるという, 従来から提案されてきたカベクトル分布型触覚センサの原理と一致する結果が得られた．なお今回得られたパターンは, 弾性体の厚みD, および反射面の高さhを変動させても変化無く, ロバストな解であった．

従来提案されてきた光の反射・拡散を距離検出に用いたカベクトル分布センサは, 反射・拡散媒体を光検出素子の真上に配置していた [5] [6] (ただし [5] では非対称な反射板形状の可能性も考察している)．これに対して今回の最適化規範によって得られた解は, あえて受光素子の真上に反射板を設けないというものであった．

この結果は, 特に接線方向の力計測を考えると直感的に理解できる．PDの真上に反射板を設けた場合, 接線方向の力による出力変化を生じさせることが難しいが, 今回の解のような配置では, 接線方向の力によって容易に差分出力を得ることができるためである．つまりセンサのダイナミックレンジを上げるための設計であると解釈出来る．

3.3.2 複数要素の場合

複数要素の場合も1要素の場合と同様に, 出力の和と差から法線, 接線方向の力を求める戦略が取られている．ただし複数要素の場合, 1要素の場合とは異なり, PDの真上に反射板が配置されている．

この違いは次のように直感的に理解できる．1要素の場合と同様にLEDの真上に反射板があるとしよう (Fig.11)．1要素の場合と異なり, 同時に複数の点で力が加わることがありうることに注意する．隣り合った二点で互いに逆向きの接線方向力が加わったとき, LEDの真上の反射板では弾性体の接線方向の移動は相殺され, 結果として反射板は上下に移動することになる．この移動は, 隣り合った2点に法線方向の力が加わった場合と区別することが出来ない．結果として力の法線, 接線成分の分離が難しくなる．

これに対してPDの真上に反射板がある場合は, 力の加わる

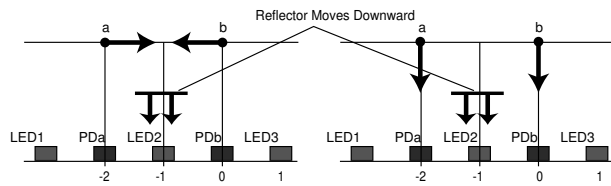


Fig. 11 Reflector on top of the LED. Tangential forces (left) and normal forces (right) produce the same motion.

点が反射板の真上なのでこのような問題が生じない．つまり複数要素における最適化結果が1要素の場合と異なるのは，計測上のクロストーク低減のためと理解できる．

3.3.3 反射板

反射板を印刷で作成する場合，中間階調，すなわち反射率にグラデーションを設けることも可能である．しかし1要素，複数要素，いずれの場合の結果も，反射率に中間階調が不要であることを示唆している．今回の最適化では反射板パターンベクトルの各要素は0か1のいずれかをとることとしたが，もし中間階調とすることでより良い最適解が得られるなら，最適化結果のパターンベクトルは0と1が混在し，その混在によって中間階調を表現したはずである．しかし実際にはそのような現象は一切生じず，0と1は完全にまとまった．

なお今回の定式化では反射板が拡散反射をすると仮定しているが，鏡面反射成分が含まれる場合も反射光量 L_i の式 (11) を変形するだけで同様に最適解を得ることができる．

また今回は光学式の触覚センサであるため，反射板の細分化によって最適化を行った．これは，光を用いているためにセンサエレメントの出力を各反射素片の反射量の合計で表すことができ (式 (18), 式 (19))，結果としてシミュレーションは各反射素片に対してのみ行えばよく，計算量を削減できるためである．もし他の物理量をセンシングするセンサエレメントを用いるなら，効率的な最適化の手順は異なったものとなるが，その場合も最適化規範自体は同様に用いることが出来ると考えられる．

4. おわりに

本稿では従来から多く提案されてきた力分布センサを力ベクトル分布センサに改造する方式の力ベクトル分布センサに対して，構造の良さを定量的に評価する枠組みを作ることを目的とし，既に多軸力センサ等において用いられている，特異値分解を用いた評価手法を用いることを提案した．

さらに変位検出に光学素子を用いた仮想的な場合に関して提案した規範を用いた最適設計を行い，妥当な結果が得られることを確認した．

最適化の結果自体に驚くべき要素は無く，従来のヒューリスティック手法で提案されてきた構造と同様の出力を得たに過ぎない．しかし今回得られた合理的な最適化結果が，自動的に得られていること，およびある規範下で最適であることが保証されていることは，今後他の手法に適用する際に重要な点であると思われる．センサエレメントが光学式で無い場合に本手法がどこまで最適設計に利用できるかは明らかでは無いが，少なくとも力分布からセンサ出力への変換行列がシミュレーションに

よって得られる状況下で利用可能であることは示されたと考えられる．

今回は全ての計測点に対して独立に法線，接線方向の力を取得することを目的としていた．しかし実際の応用に際しては，例えば法線方向の力に対して必要な空間解像度と，接線方向の力に対して必要な空間解像度は異なる可能性が高い．また一般には必要な情報は法線，接線方向の力成分ではなく，それらの何らかの線形和である状況が考えられる．今後はそのような場合に本手法を適用し，実的な触覚センサの設計に利用できることを示す．

参考文献

- [1] M. H. Lee and H. R. Nicholls: "Tactile Sensing for Mechatronics - a State of the Art Survey," *Mechatronics*, vol.9, pp.1-31, 1999.
- [2] S. Koterba and Y. Matsuoka: "A Triaxial Force Discernment Algorithm for Flexible, High Density, Artificial Skin," *Proc. of Int. Conf. Robotics and Automation*, 2006.
- [3] M. Ohka, Y. Mitsuya, I. Higashioka, H. Kabeshita, "An experimental optical three-axis tactile sensor for micro-robots," *Robotica*, vol.23, pp.457-465, July-Aug. 2005
- [4] 山田, M. R. Cutkosky: "3 軸力覚・振動覚を有する触覚センサの開発と物体の並進・回転滑り識別への応用," *日本ロボット学会誌*, vol.13, No.4, pp.91-96, 1995.
- [5] J. Rossiter and T. Mukai: "Optical-Based Tactile Sensor using only a Low-Cost Matrix of Light Emitting Diodes," *Proc. of Int. Sympo. Robotics*, TU414, 2005.
- [6] G. Hellard and R. A. Russel: "A Robust, Sensitive and Economical Tactile Sensor for a Robotic Manipulator," *Proc. of Australasian Conf. Robotics and Automation*, 2002.
- [7] 広瀬, 米田: "分割型光検出器を用いた3軸力センサ," *日本ロボット学会誌*, vol.7, No.1, pp.31-38, 1989.
- [8] K. Kamiyama, K. Vlcek, T. Mizota, H. Kajimoto, N. Kawakami, S. Tachi: "Vision-Based Sensor for Real-Time Measuring of Surface Traction Fields," *IEEE Computer Graphics & Applications Magazine*, pp.68-75, Vol. Jan-Feb, 2005.
- [9] L. D. Landau and E. M. Lifshitz: "Theory of Elasticity," Butterworth-Heinemann, 1985.
- [10] 内山, 中村, 箱守: "特異値分解によるロボット力覚センサの構造評価," *日本ロボット学会誌*, vol.5, No.1, pp.4-10, 1992.
- [11] G. Canepa, M. Morabito, D. Rossi, A. Caiti, T. Parisini: "Shape from touch by a neural net," *Proc. of Int. Conf. Robotics and Automation*, 2006.
- [12] M. Bendsoe and O. Sigmund: "Topology Optimization: Theory, Methods and Applications," Springer, 2003.

梶本裕之 (Hiroyuki Kajimoto)

1975年11月7日生．1998年3月東京大学工学部計数工学科卒業．2003年3月同大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻博士課程退学．博士 (情報理工学) 2001年4月日本学術振興会特別研究員 (DC1)．2003年4月東京大学助手．2006年9月電気通信大学助教授．2007年4月同准教授．触覚ディスプレイ，触覚センサ，バーチャルリアリティシステムなどの研究開発に従事．日本バーチャルリアリティ学会，日本ロボット学会，計測自動制御学会各会員． (日本ロボット学会正会員)