

触覚カメラ 弾性を持った光学式3次元触覚センサの作成

学生員 神山 和人* 非会員 梶本 裕之*
非会員 稲見 昌彦* 非会員 川上 直樹*
非会員 舘 暲*

Development of A Vision-based Tactile Sensor

Kazuto Kamiyama*, Student Member, Hiroyuki Kajimoto*, Non-member, Masahiko Inami*, Non-member, Naoki Kawakami*, Non-member, Susumu Tachi*, Non-member

Receiving tactile information from a slave-robot is a necessary component of teleexistence with haptic display, but there are few tactile sensors that can measure the distribution of three-dimensional force vectors on a surface. For this reason, we developed a sensor that provides three-dimensional force distribution by detecting movement vectors in the transparent elastic body with a video camera. From a result of the experiment, it turned out this approach is effective.

キーワード：テレイグジスタンス，触覚センサ，光学式，力ベクトル分布

Keywords: Teleexistence, Tactile Sensor, Vision based, Force Vector

1. はじめに

バーチャルリアリティや，あたかも遠隔地に存在するかのよう感じさせる技術であるテレイグジスタンス⁽¹⁾において触覚情報の伝達は現実感を生み出し，作業効率を向上させるために必要な技術課題である。現在，触覚情報を提示する装置として様々な触覚ディスプレイが研究されており，岩田らによる機械式⁽²⁾や梶本らによる電気式⁽³⁾などが存在する。しかし，テレイグジスタンスにおける触覚を考えた場合，ディスプレイと対になる技術として遠隔地の情報を取得する触覚センサが必要になる。このとき計測された情報は提示されるために存在することになるが，現状で存在する触覚センサと言われるものの多くは必要な提示情報を取得できない。今回，我々はこの触覚提示させるのに必要な情報を得るための触覚センサに注目した。

提示を目的としたとき，どのような能力をセンサに持たせるべきかが決定される。第一に力のベクトルを測定しなければならない。人間は指先に加わる力の大きさだけでなく方向も知ることができるからである。第二に分布計測が可能である必要がある。指先は力の分布を知覚することが

でき，どのような形状の物体から力を受けているかを知ることができる。第三にセンサは弾性の性質を持たなければならない。触覚は視覚などと違い対象との相互作用が存在する。指が物体に触れるとき力が物体に与えられ，変形など何らかの影響が生まれる。また指に対しても物体から反力としての力が働き，変形等の影響を受ける。互いに影響し合う状況を指と等価に作り出した上でセンシングできないと，指が触れた際に知覚する情報と異なったものになってしまう。

現在3次元ベクトルが計測できる点，分布計測可能という点及び弾性を持っているという点の3点すべてを満たした触覚センサは少ない。すでに商品化されている6軸力センサなど一点にかかる力のベクトルを求めるものや，フィルム状応力分布センサ，ベクトル分布を計測できるが弾性としての性質を十分に持たせることが困難であるもの⁽⁵⁾など，1，2点を満たすものは多くあるが，3点すべてを満たすことは出来ない。そこで我々は触覚提示のための，つまり力の3次元ベクトル分布を求められ弾性を持った新しい光学式の触覚センサである触覚カメラを提案する。

2. 力ベクトル分布計測理論

我々の提案する触覚センサである触覚カメラは透明弾性体と CCD カメラを用いて構成される。透明弾性体内部の変形情報を CCD カメラを用いて計測し，変形情報から力

*東京大学
東京都文京区本郷 7-3-1
The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

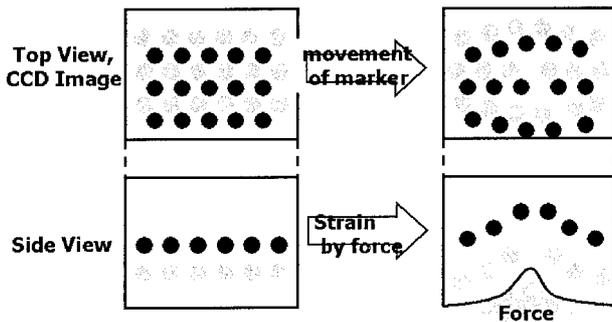


図 1 触覚カメラにおける計測のイメージ
Fig. 1. Image of sensing.

分布を再構成するというものである。

変形情報を取得する方法には様々なものが考えられるが、今回提案する方法はその一つとして弾性体内部の表面に対して平行な面内に測定点として球状の赤色マーカーを格子状に $M \times N$ 個配置し、弾性体表面を xy 平面に、その垂直方向を z 軸にとり、CCD を用いて $+z$ 方向から球状マーカーを撮影する。これにより変形の際の測定点の移動を xy 平面に写像した形で計測できる (図 1 参照)。しかし、このままでは情報量が少なく変形情報から力ベクトル分布を再構成することは困難である (情報量の問題についての詳細は後述)。そこで最初に配置したマーカーの深さ $z = a$ とは異なった深さ $z = b$ に異なった色である青色マーカーを並べる。そして撮影した画像を 24bit bitmap 形式で取り込み、red 成分・blue 成分を画像データから取り出すことで高さの違うマーカーの情報を分離することが可能になる。2 種類のマーカーを用いることはサンプリング点 (x, y) において高さの違う 2 つの 2 次元移動ベクトルをそれぞれ異なった情報として求めることに等しく、情報量を増やし力ベクトル分布が求めやすくなる。

2.1 マーカーの位置計測及び移動ベクトル群計測
力ベクトル分布を計測する際、前処理として変形が起っていない状態での CCD 画像から各々のマーカーの中心位置を決定した。この前処理を行うことにより任意の位置にマーカーを配置でき、カメラの位置合わせを必要としなくなる。マーカーの中心位置決定には重心計測を用いた。重心を計測することで、本来 pixel という整数値でしか画像中の位置を表せなかったものが sub-pixel 精度で中心位置を決定できる。

次に移動ベクトル群の計測方法である。弾性体表面に力を加えると変形を起しマーカーが移動する。その移動は CCD を通して観察される。変形の無い状態で計測したマーカー位置を中心に、変形しマーカーが移動した後の画像を切り出す。切り出した画像中の重心の位置と変形の無い状態での重心の位置との差分をとることで任意のマーカーの xy 方向の移動量を計算できる。この場合、区切った範囲内の移動しか計測できなくなってしまうが、必要ならば力を加えていないときのマーカーの位置との差分をとるのでは

なく、力が加わっているある瞬間のマーカーの位置を中心に次の瞬間の画像を区切ることで追跡して移動ベクトルを計算することもできる。

2.2 力ベクトル分布再構成
移動ベクトル群から力ベクトルを求めるために弾性体が半無限線形弾性体であるという仮定と弾性体理論を用いる⁽⁹⁾。弾性体表面のある点を原点としたとき、原点に力 $\vec{f} = (f_x, f_y, f_z)$ が加わった際の内部の点の位置 $\vec{r} = (x, y, z)$ における xy 平面に平行な面内の移動 $\vec{u} = (u_x, u_y)$ は式 2, 式 1 で表される。ここで σ はポアソン比で、理想的に弾性体を非圧縮と考えて 0.5 とした。また E はヤング率であり実際に用いる弾性体によって適切に定めなければならないが、式から明らかにヤング率 E は式全体にかかっており \vec{u} を定数倍するのみの効果であるため、1 とする。

$$u_x = \frac{1 + \sigma}{2\pi E} \left\{ \left[\frac{xz}{r^3} - \frac{(1 - 2\sigma)x}{r(r+z)} \right] f_z + \frac{2(1 - \sigma)r + z}{r(r+z)} f_x + \frac{[2r(\sigma r + z) + z^2]x}{r^3(r+z)^2} (xf_x + yf_y) \right\}, \dots \quad (1)$$

$$u_y = \frac{1 + \sigma}{2\pi E} \left\{ \left[\frac{yz}{r^3} - \frac{(1 - 2\sigma)y}{r(r+z)} \right] f_z + \frac{2(1 - \sigma)r + z}{r(r+z)} f_y + \frac{[2r(\sigma r + z) + z^2]y}{r^3(r+z)^2} (xf_x + yf_y) \right\} \dots \quad (2)$$

この式から、それぞれ力が $\vec{f} = (f_x, f_y, f_z) = (1, 0, 0)$, $(f_x, f_y, f_z) = (0, 1, 0)$, $(f_x, f_y, f_z) = (0, 0, 1)$ と各 x, y, z 成分に単位力が加わったときのある深さ $z = z_1$ での平面内の点の移動ベクトルを $\vec{u}_{fx} = (h_{xx1}, h_{yx1})$, $\vec{u}_{fy} = (h_{xy1}, h_{yy1})$, $\vec{u}_{fz} = (h_{xz1}, h_{yz1})$ のように表記する。この移動量 h はそれぞれの方向の原点単位力に対するインパルス応答と考えることができ、弾性体に加わる力を分布として $\vec{f}(x, y) = (f_x(x, y), f_y(x, y), f_z(x, y))$ と分布関数として表記し直すと、ある深さ $z = z_1$ での平面内の点 (x, y) における移動ベクトルは線形性から畳み込み積分の形で計算される (式 3)。

$$\begin{aligned} m_{x1}(x, y) &= h_{xx1} * f_x + h_{yx1} * f_y + h_{xz1} * f_z, \\ m_{y1}(x, y) &= h_{xy1} * f_x + h_{yy1} * f_y + h_{yz1} * f_z \\ &\dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

ただし * は畳み込み積分を表す。これらを離散化し行列表示してまとめる。移動ベクトル、力ベクトルのサンプリング点数を $M \times N$ 点とすると、移動量は行列表示され、 x 方向成分 M_{x1}, y 方向成分 M_{y1} はそれぞれ $M \times N$ の行列になるが、要素 (1, 1) から (M, N) までひとつのインデックスで順番付け、ベクトルとして並べ替える。力ベクトル分布 \vec{f} についても同様にベクトル表記化する。すると以下の式 4 のように行列表示することが可能となる。

$$\begin{bmatrix} M_{x1} \\ M_{y1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{xx1} & H_{yx1} & H_{xz1} \\ H_{xy1} & H_{yy1} & H_{yz1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \dots \quad (4)$$

これは弾性体表面に力ベクトル分布が与えられたとき内部の点の移動を計算する式である。しかし力ベクトル分布 F を未知数、内部の点の移動 M を計測によって与えられる数として考えると、未知数 F を求める連立方程式とみなすことができる。この連立方程式を解くことにより F が計算できる (式 5)。

$$F = H^{-1}M \dots \dots \dots (5)$$

ここで式 4 における左辺のベクトル M と右辺のベクトル F の要素数を考えてみる。サンプリング点が $M \times N$ であるから移動ベクトルの要素数は $M \times N \times 2$ となり、力ベクトルの要素数は $M \times N \times 3$ となる。つまり連立方程式の異なった式の個数よりも未知数の個数が数として多いことを意味し、未知数を決定することが難しくなってしまう。そこで本章冒頭で述べた色情報を用いて異なる高さ $z = z_2$ でも移動ベクトルを求めるという手法が用いられる。異なる高さにある点の原点単位力によるインパルス応答 h は異なった値をとり、式 4 とは異なった方程式が立てられ式 6 に示すように式数を増すことができる。

$$\begin{bmatrix} M_{x1} \\ M_{y1} \\ M_{x2} \\ M_{y2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{xx1} & H_{xy1} & H_{xz1} \\ H_{yx1} & H_{yy1} & H_{yz1} \\ H_{xx2} & H_{xy2} & H_{xz2} \\ H_{yx2} & H_{yy2} & H_{yz2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \dots (6)$$

2 つの高さにおける計測により未知数の数より方程式の数の方が多き状況となり、力ベクトル分布 F を計算しやすくなる。この二つの式を $M = HF$ とまとめて書く。行列 H は正方行列ではなく逆行列が存在しないため、擬似逆行列を用いて計算することになる。本論文の今後のつながりから簡単に擬似逆行列について説明しておく。(文献⁽¹⁰⁾参照)

擬似逆行列は最小自乗法によって求められる。まず、最も確からしい力ベクトル分布の値との誤差を e として次式 7 のように表す。

$$M = HF + e \dots \dots \dots (7)$$

この誤差の絶対値 $\|e\|$ を最小化するように F を定める。誤差の絶対値 $\|e\|$ は以下の式 8 のように表せる。

$$\begin{aligned} \|e\|^2 &= \|M - HF\|^2 \\ &= \frac{1}{2} F^T Q F + cF + d \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

$$Q = 2H^T H, c^T = -2M^T H, d = M^T M$$

式 8 における右辺の微分値が 0 となる F が誤差を最小化する値である (式 9)。

$$\begin{aligned} QF + c &= 0 \\ F &= (H^T H)^{-1} H^T M \dots \dots \dots (9) \end{aligned}$$

2・3 力ベクトル分布再構成の安定化 移動量計測にはノイズが含まれてしまうが、これに対して力ベクトル分布計算の安定性を上げるためのアルゴリズムを説明する。前節の最小自乗法による計算に何らかの制約を設けるというものである。

制約として今回用いたものは、弾性体に加えられる力は有限であり計算される力ベクトルは発散しない、という条件である。定式化すると I を単位行列として以下のようになり、力ベクトルそれぞれのノルムの 2 乗和を最小化する意味となる (式 10)。これに重み ω を掛け、式 8 と合わせるとで式 11 と表せる。

$$\begin{aligned} \|F\|^2 &= \|F(1)\|^2 + \|F(2)\|^2 + \|F(3)\|^2 + \dots \\ &= F^T I F \dots \dots \dots (10) \end{aligned}$$

$$\min \left\{ \frac{1}{2} F^T (Q + \omega I) F + cF + d \right\} \dots \dots \dots (11)$$

他にも安定化のための制約として、粘着性の物体をセンシングしない限り z 方向の力は常に正の値とする制約や、力ベクトルの分布は空間的に急激に変化しないという仮定をすることで隣り合ったベクトルの差のノルムを最小化する制約も設けることができる。

2・4 CCD 画像の補正 本研究ではこの章で述べてきたように弾性体表面に平行な面方向の 2 次元移動ベクトルから力ベクトル分布を再構成する方法を用いている。これは CCD カメラによって撮影された画像が 2 次元であるためであり、3 次元の移動ベクトルを xy 平面に平行写像することを意味する。しかし実際には図 2 のように xy 平面へ CCD レンズを中心に写像するため、本来移動が無いと計算されるべき z 軸方向の移動も、 xy 方向の移動として検出されてしまう。そのため式 3 中で使用されているインパルス応答 h を z 方向移動の写像を含める形で補正してやらなければならない。

3. 計測装置

今回作成した触覚カメラのシステムは図 3 になる。

高さ 40mm、縦 90mm、横 100mm の透明弾性体の上部表面に黒色の遮光層を設ける。弾性体上部に対して力が加えられる。さらに表面から深さ約 3mm に青色の球状マーカーを深さ約 6mm に赤色の球状マーカーを 1.5mm 間隔で配置する。マーカーの直径は約 0.6mm である。弾性体を固定した透明アクリル板を通して弾性体内部のマーカーを CCD カメラで撮影する。撮影領域はおよそ 18mm×14mm である。マーカーの映像は NTSC 形式で出力され、USB 接続のキャプチャユニットを通して PC に送られる。

透明弾性体にはシリコン (信越シリコン社製 KE109) を使用し、マーカーには色のついたプラスチック球 (ダイセル化学工業株式会社製 自由樹脂) を使用した。マーカーとして使用したプラスチック球は人間の 2 点弁別

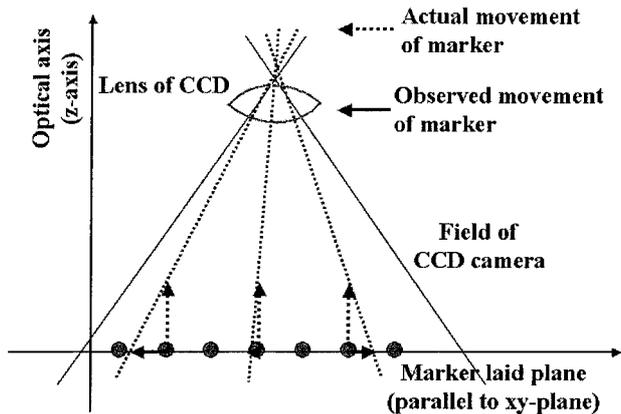


図2 CCDカメラのレンズを中心としたz方向移動の写像

Fig.2. Necessity to calibrate image of CCD camera.

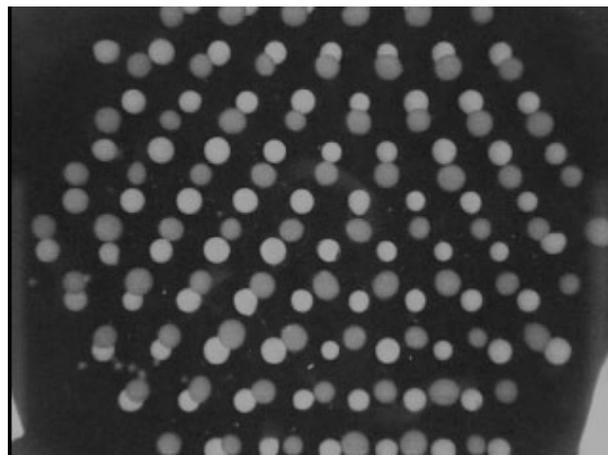


図4 CCDカメラによって撮影された画像
Fig.4. Bit-mapped image by CCD camera.

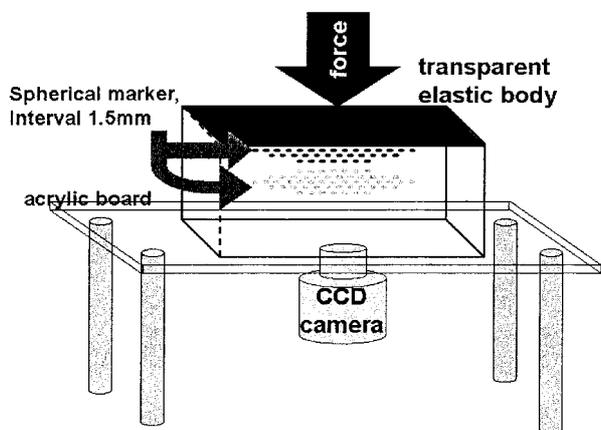


図3 計測装置図

Fig.3. Image of sensor system.

における空間分解能の限界 (2mm) 程度の間隔で配置した。また半無限線形弾性体の仮定が崩れず高さの違うマーカールが出来るだけ重なり合わない程度に小さい必要があるが、重心計算がサブピクセルまで求められる程度の大きさを持つように、CCDで撮影したとき球の直径が画像上で数pixelに相当する大きさに調整した。

4. 実験

4.1 CCD画像の取得 図4が撮影された画像である。変形が起こっていない状態での画像と起こった後の画像を用いてマーカールの移動ベクトル群を計算する。

4.2 移動ベクトル群の計測 力を加えていない状態で撮影した画像を移動前、その画像の全体を右(x方向)に3pixelシフトさせたものをマーカール移動後の画像としてマーカールの移動ベクトルを計算させたとき、赤色マーカールと青色マーカールのx方向及びy方向の移動量のヒストグラムは図5のようになり、平均、標準偏差は表1のとおりとなった。表から移動量はほぼ正確に計算されていることが分かり、分散も1pixel以下に抑えられている。

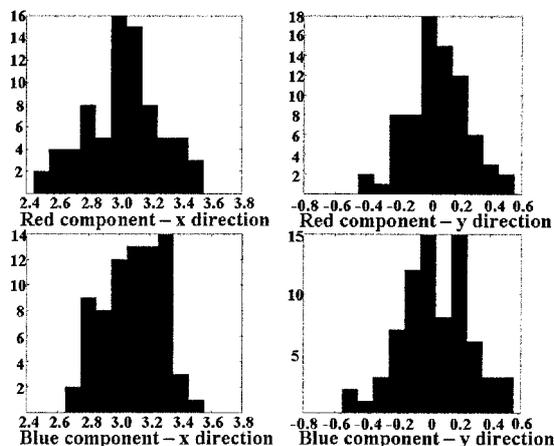


図5 計算された移動量のヒストグラム
Fig.5. Histogram of movement.

表1 計算された移動量の平均及び標準偏差
Table 1. Test of measuring movement.

Component	direction	Average(pixel)	SD
Blue	x	3.09	0.19
	y	0.05	0.22
Red	x	3.02	0.25
	y	0.06	0.19

図6がマーカールの位置を測定し、弾性体表面に垂直な方向である+z方向に直径5mmの円柱を使用して910g重の力を加えた際における赤色マーカールの移動ベクトル群である。放射状に広がっていく方向に変形が起こり、移動ベクトルは放射状の変形を弾性体表面に写像した形になっている。なおベクトルの大きさは実際の移動量を5倍したものになっている。

4.3 カベクトル分布再構成 本節ではセンサヘッドである弾性体に加わる力をz方向のみの場合とxy方向も伴う場合に分けてそれぞれの方向成分が正しく計測されているかどうかを評価していく。

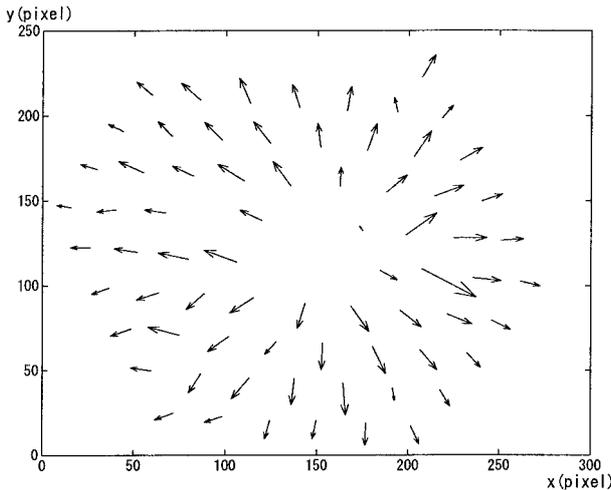


図 6 直径 5mm の円柱を用いて $+z$ 方向にのみ力を加えた際における赤色マーカーの移動ベクトル群
 Fig. 6. Calculate movement vectors of red markers when given z -directional force.

4・3・1 z 方向のみの力を加えた場合 直径 5mm の円柱で弾性体表面に対して垂直方向に 910g 重の力を加えた際の計算された力ベクトルを図 7 に示す。

制約条件を何も設けずに計算した結果は大きく発散してしまい力を加えた点とは明らかに違った点で非常に大きな値をとる結果になったため、制約条件として力ベクトルのノルム自体を最小化するという制約 (式 10) を課した場合の再構成結果となる。力が加えられた中心付近にのみ z 方向の力が計算されていることが分かる。計算時間としておよそ 0.08sec かった。(CPU Pentium4 1.8GHz 使用時)

図 7 は第 2 章最終節で述べたカメラに関するキャリブレーションを行った上で求めたものであるが、図 8 にこの調整を行わないで力ベクトルのノルム自体を最小化させる制約を設けて計算させた結果を示す。図 7 と比較して力が加えられていない点にも矢印が伸びていることが分かる。

次に計測される力の大きさに関する分解能および線形性の評価を行った。直径 5mm の円柱で弾性体表面に対して垂直方向に 0g 重から 1000g 重までの 5 種類の大きさの力を加え、触覚カメラからの出力である力ベクトル分布の z 方向成分の和をとった。それぞれの力に対して 10 回の計測を行い平均を求めた結果を図 9 に示す。

実際に加えられている力を知るために別の力センサが必要であり、6 軸力センサ (BLAUTOTEC, LTD. ビーエル NANO センサ) を用いた。この力センサはセンサ内の一点に加わる x, y, z 方向の力及びトルクを計測することができるが、今回は x, y, z 方向の力のみを調べた。横軸が 6 軸力センサからの出力 (F^{app}) を表し、縦軸に今回作成した触覚カメラからの出力 (F^{est}) を表している。線分は最小自乗を用いてフィッティングしたものであり、フィッティングの結果として得られた傾きを触覚カメラの出力の較正に用いた。そのため図 9 の線分は $F^{est} = F^{app}$ を表している。10g 重

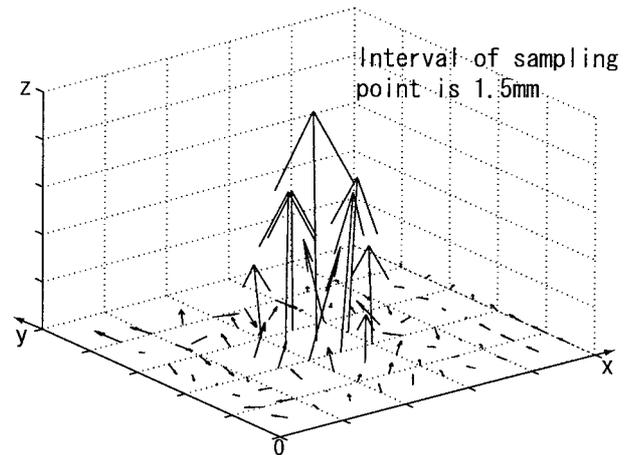


図 7 直径 5mm の円柱を用いて $+z$ 方向にのみ力を加えた際における計算された力ベクトル分布
 Fig. 7. Distribution of force vector using circular cylinder of 5mm diameter.

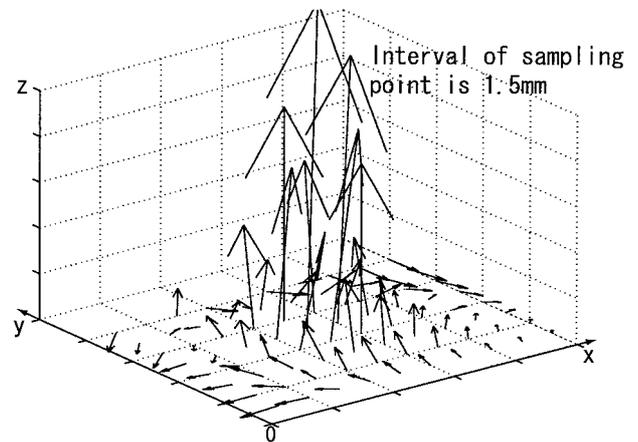


図 8 計算された力ベクトル分布 (画像の補正無し)

Fig. 8. Distribution of force vector: minimizing norm of vector without camera calibration.

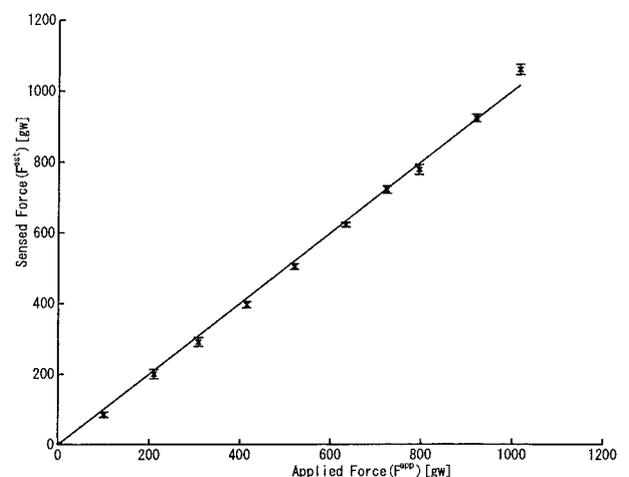


図 9 計測された力の大きさに関する精度の評価
 Fig. 9. Evaluation of magnitude of force.

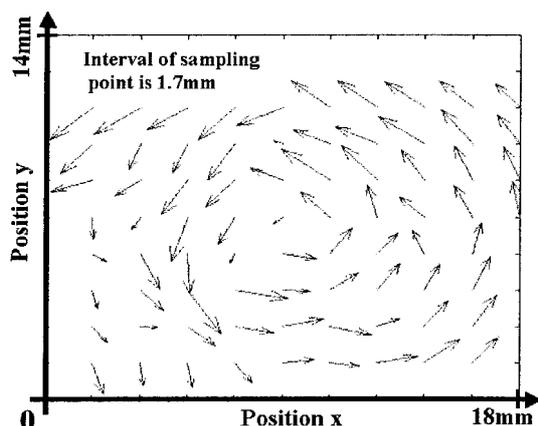


図 10 半径 20mm の円柱を用いて z 軸を中心にねじりを加えた際の xy 方向の力ベクトル分布
Fig. 10. Applied torque around z -axis.

前後の分解能を持っていると考えられ、今回計測した 1kg 重までは線形性があると思われる。

4.3.2 xy 方向成分を持つ力を加えた場合 半径 20mm の円柱で z 方向に力を加えた上で z 軸を中心に時計方向のねじりを弾性体に加えた時の再構成結果を図 10 に示す。予想されたように渦を描く形で力が計測されている。

5. 考 察

5.1 移動ベクトル計測 表 1 から平均のみを見ると精度良く移動ベクトルが計算できていると思われるがヒストグラム (図 5) から最大で ± 0.4 pixel 程度の分散をもっていることが分かる。移動ベクトルの最大値がおよそ 10pixel であることに対する ± 0.4 pixel という分散は測定精度が良いとは言えない。実際に計測されるデータが移動であり求めたい量である力ベクトルはそこから計算されるものであるため、移動ベクトルの精度以上の力ベクトルの精度を出すことはできない。現在赤色マーカーと青色マーカーのビットマップ画像による分離が不完全でありそこから発生してくる移動ベクトルの計算誤差が多く入っていると思われる。しかし、この問題に関しては赤色マーカーを撮影するときは赤色光をマーカーに当て、青色マーカーを撮影するときは青色光をマーカーに当てる、などを行うことで解決できると考える。

5.2 力ベクトル分布計測 移動ベクトルから力ベクトルを計算するという作業は逆問題である⁽¹⁰⁾。現在までに逆問題解法に関して様々な手法が提案されており今回その中の一つである力ベクトルの大きさに関する制約という手法を用いた。この手法は「解の単純さ」というものを仮定して用いられる制約であるため、結果として分布計測における一つの重要な評価基準である空間分解能を下げってしまう。制約を設けなければならなかった理由として、移動ベクトル群計測による誤差の発生、半無限弾性体という仮定を実際の弾性体が完全に満たしているわけではない、という 2 点が挙げられる。前者に関しては前節でも述べたよ

うにマーカーの分離を完全にすることで解決できると考える。後者に関しては式 3 における原点単位力による移動 h を理論からではなく、実際に点に力を加えるなどの実測によって求めることで半無限弾性体という仮定を用いずに計測可能であると考えられる。

以上の 2 点を解決することにより図 9 にみられる誤差や平均値のずれをより少なくできるはずである。

5.3 計算速度 現状での本触覚カメラの計算速度は 0.08sec 程度である。画像のキャプチャに約 0.03sec、ノイズを落とす作業に 0.02sec、その他の計算で残りである。それに対し人の指先の機械受容器の発火する周波数は、粗い振動を知覚させるマイスナー小体や変位を知覚するメルケル細胞で数十 Hz、また高周波振動を検知するパチニ小体で 200Hz 程度であると言われている。しかしパチニ小体は比較的低密度で分布しているといわれており、高密度で配置できないが応答速度の速い別のセンサに高周波振動計測を担わせることができる。これにより我々の目指す応答速度はマイスナー小体やメルケル細胞の発火する領域でよくなり 70Hz 程度となる。そしてプログラムを最適化させることで 70Hz 程度の速度で計算できると考えている。

6. ま と め

第 1 章で論じたように今回の我々の目的は触覚提示のための触覚センサの開発である。この目的に対して弾性を持ち 3 次元力ベクトル分布計測可能なセンサである触覚カメラを作成した。これにより力の大きさの分布のみを計測するセンサでは困難であると思われるねじりによる水平方向に加わる力を計測できた。また CCD カメラを用いたことにより、小型化の際に多くの分布型触覚センサが持つ配線量の問題を解決している。さらに対象との接触を伴うため耐久性が必要になってくるが、弾性体中には機械的な素子が含まれていないため容易に交換可能である。これらの点から今回作成した触覚カメラは触覚提示を目的としたセンサとして有効に働くと考えられる。

今回メルケル細胞の取得情報と等価である力ベクトル分布の計測を行ったが、今後の予定としてマーカーの移動速度計測を利用しマイスナー小体の知覚情報である振動情報の取得を行っていく。また指型の触覚カメラを作成し、触覚ディスプレイと対応させることで計測情報の有用性を検証していきたい。

(平成 14 年 2 月 28 日受付, 同 14 年 7 月 25 日再受付)

文 献

- (1) 館 暉・廣瀬通孝: パーチャル・テック・ラボ, 工業調査会 (1992)
- (2) R.Kawamura, H.Yano, and H.Iwata: "Development of surface type haptic interface for presentation of rigidity distribution", *Proceedings of the Virtual Reality Society of Japan*, 5 pp.51-54 (2000)
- (3) H.Kajimoto, N.Kawakami, T.Maeda, and S.Tachi: "Tactile Feeling Display using Functional Electrical Stimulation", *The Ninth International Conference on Artificial reality and*

Telexistence, pp.107-114 (1999)

- (4) H.Shinoda: "Tactile Sensing for Dexterous Hand", *Journal of the Robotics Society of Japan* Vol.18, No.6, pp.767-777 (2000-6) (in Japanese)
篠田裕之: 「器用な手の皮膚と触覚」, 日本ロボット学会誌, 18, 6, pp.767-771 (2000)
- (5) M.Ohka, Y.Mitsuya, K.Hattori, and I.Higashioka: "An Experimental Optical Tactile Sensor Featuring an Arvay of Pyramidal Projections", *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.65, No.636, pp.178-185 (1999) (in Japanese)
大岡昌博・三矢保永・服部和敏・東岡制: 「ピラミッドアレイ状光導波形触覚センサの試作」, 日本機械学会論文集(C編) 65, 636, pp.178-185 (1999)
- (6) T.Maeno, S.Hiromitsu, and T.Kawai: "Control of Grasping Force by Estimating Stick/Slip Distribution at the Contact Interface of an Elastic Finger Having Curved Surface", *Journal of the Robotics Society of Japan* Vol.19, No.1, pp.91-99 (2001-1) (in Japanese)
前野隆司・広光慎一・河合隆志: 「曲面状弾性フィンガの固着・滑り分布推定に基づく把持力の制御」, 日本ロボット学会誌, 19, 1, pp.91-99 (2001)
- (7) 前野隆司・河合隆志・小林一三・平野雄一: 「把持力制御のための曲面状局所滑りセンサの開発」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'97 講演論文, Vol.B, pp.763-764 (1997)
- (8) K.Tanie, K.Komoriya, M.Kaneko, and S.Tachi: "A HIGH RESOLUTION TACTILE SENSOR", *proceedings of the 4th international conference on robot vision and sensory controls*, pp.251-261 (1987)
- (9) L.D.Landau and E.M.Lifshitz: *Theory of Elasticity*, BUTTERWORTHHEINEMANN (1985)
- (10) William Menke: *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*, Academic Press, Inc., (1989)
- (11) R.S. Fearing and J.M. Hollerbach: "Basic Solid Mechanics for Tactile Sensing", *The International Journal of Robotics Research*, Vol.4, No.3, pp.40-54 (1985)
- (12) R.S.Fearing: "Tactile Sensing Mechanisms", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 9, No. 3, pp 40-54 (1990)
- (13) R.S.Fearing: "Using a Cylindrical Tactile Sensor for Determining Curvature", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.7, No.6, pp.806-817 (1991)
- (14) 大山 正・今井省吾・和気典二: 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房 (1994)

神山和人 (非会員) 平成 13 年 3 月 東京大学工学部計数工



学科卒業。現在, 同大学大学院システム情報学専攻修士課程在学中。触覚センサ, パーチャルリアリティの研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会学生会員。

梶本裕之 (非会員) 平成 13 年 3 月 東京大学大学院計数工



学修士課程了。現在, 同大学院博士課程在学中。触覚ディスプレイ, 人工現実感システムなどの研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会学生会員。

稲見昌彦 (非会員) 平成 11 年 3 月 東京大学工学系研究科



先端学際工学専攻博士課程修了。工学博士。同年より東京大学国際・産学共同研究センター リサーチ・アソシエイト。2001 年東京大学大学院情報理工学系研究科 助手。ロボット及びバーチャルリアリティの研究に従事。IEEE Computer Society, 日本ロボット学会, 日本バーチャルリアリティ学会等 各会員

川上直樹 (非会員) 平成 11 年 3 月 東京大学大学院先端



学際工学博士課程了。工学博士。同年同大学大学院計数工学専攻助手。平成 13 年同大学院システム情報学専攻講師。バーチャルリアリティの研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会会員。

舘 暲 (非会員) 昭和 43 年 東京大学工学部計数工学科



卒業。昭和 48 年同大学大学院博士課程了。工学博士。同年同大学助手。昭和 50 年通産省工技院機械技研研究員, 主任研究官, 遠隔制御課長, バイオロボティクス課長, マサチューセッツ工科大学客員研究員を経て, 平成 1 年東京大学先端科学技術研究センター助教授。平成 4 年同センター教授。平成 6 年同大学大学院工学部計数工学科教授。盲導犬ロボット, テレイグジスタンス, 人工現実感などの研究に従事。IEEE/EMBS 学会賞, 通産大臣賞, 国際計測連合 (IMEKO) 特別勲功賞などを受賞。IMEKO ロボティクス会議議長。SICE フェロー。日本バーチャルリアリティ学会監事。