空間フィルタリング系のための多軸平行光学系と 空間周波数成分の創出[†]

曹 麗*・小林 彬*

Multiple Parallel Optical-Axes System and Generation of a Spatial Frequency Component for a Spatial Filtering Measurement System

Cao Li* and Akira KOBAYASHI*

In the velocity measurement based on spatial filtering method, no output signal is obtained, when the aimed spatial frequency component corresponding to the slit pitch of the detector is not contained in the object pattern.

For realizing a variable spatial frequency selectivity to match with an object, the problem has been solved by changing the slit width with mechanical or electronic means.

In this paper, a different principle to generate the characteristic spatial frequency component in advance is considered for spatial filtering system. We propose a multiple parallel optical-axes (MPOA) system realized by a lenticular lens here.

In the multi-projected pattern by MPOA, the spatial frequency component is newly generated, and the spatial frequency is determined by the optical-axes pitch and the magnification factor of MPOA system. This function is complexed by moving averaging effect due to the finiteness of lens visual field, and by the compound-synchronous emphasizing effects that depend on the multiple optical axes.

Analysis for MPOA system is presented, and the generation of spatial frequency component is examined with computer simulations and proper experiments.

Key Words: spatial filtering, multiple parallel optical-axes, spatial frequency component absence, spatial frequency component generation, lenticular lens

1. はじめに

空間フィルタ法による速度計測法^{1),2)}がよく知られている。ランダムなパターンをもつ対象の速度計測などに利用され、出力信号の平均周波数は、対象の移動速度 v に比例する。

この場合、対象とする空間パターンに選択する空間周波数成分が含まれていないか、または少ないと、出力信号の振幅がほとんど消失し、計測系としての問題が生じる（空間周波数成分不在問題）。

このような問題に対する解決策として、対象に存在する別の空間周波数成分を選択するように空間フィルタ側の選択特性を適合させていく方法がいくつか提案されている^{3)-6),11)}。

いずれも選択する空間周波数が可変なところが特徴であるが、問題は、可変性を実現するだけでなく、できれば、

- 1) 処理の並列性が保たれ、速度測定への応答が速いこと
- 2) 選択する空間周波数が連続的にとれること
- 3) 選択すべき空間周波数を変更することについて適応性があり、適応速度が速いこと
- 4) 系の構成が簡単なこと

などの点も十分考慮される必要がある。

しかし現状は必ずしも望ましい状況にはない。

この点そのような方式とは別に、必要な空間周波数成分を創出することができれば、計測目的の実現と計測系の構成の簡便性の点できわめて有利である。

そこで本論文では選択する空間周波数可変化のアプローチと違って必要な空間周波数成分を創出することを目的として、光学系の複合化に基づく多軸平行光学系を導入した新しい計測系を提案する。

多軸平行光学系を通して、いったん中間的な空間パ

[†] 第31回自動制御連合講演会で発表 (1988・10)

* 東京工業大学工学部 東京都目黒区大岡山 2-12-1

* Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo
(Received April 24, 1989)

(Revised July 13, 1989)

ターンを結像させ、対象に元々含まれていなかった空間周波数スペクトル成分をこの結像パターンの中に積極的に作り出し、空間フィルタの選択特性に整合した空間パターンを常に利用できるようにする方法について理論的、実験的に検討することが本論文の目的である。

2. 多軸光学系の構成と結像パターンの空間周波数スペクトル解析

必要な空間周波数成分を創出するためには対象パターンに対する何らかの能動的加工が必要となるが、一つのアプローチとして、多軸平行光学系を利用することが考えられる。そこで以下では、まず多軸平行光学系の結像について解析を行う。

2.1 多軸平行光学系の結像

Fig. 1 に多軸平行光学系の基本的構成を示す。図において(a)は通常の単一軸の光学系であり、これに対し(b)の多軸平行光学系は、単一軸系の光軸をピッチ p_i ずつ平行移動したものを複数、並列配置することによって構成されたものである。なお、 β は光学系の倍率で、 k_i は各光軸の座標を表わす。

単一軸系と多軸系による結像をそれぞれ $g_0(\xi, \eta)$, $g(\xi, \eta)$ とすると、 $g(\xi, \eta)$ は $g_0(\xi, \eta)$ の重ね合せとして(1)式で表わされる。

(a) Single optical-axis system

(b) Multiple parallel optical-axes (MPOA) system

Fig. 1 Imaging system with multiple parallel optical-axes

$$g(\xi, \eta) = \sum_{i=-n}^n g_0(\xi, \eta - (1+\beta)k_i) \quad (1)$$

簡単のため、 η 軸方向だけを考察するものとするば、

$$g^*(\eta) = \sum_{i=-n}^n g_0(\eta - (1+\beta)k_i) \quad (2)$$

である ($(2n+1)$ は有効な光軸の本数を表わす)。

ここで多軸系のレンズ特性として、結像領域を制限するウィンドウ効果 $D_0(\eta)$ を考慮すると(2)式は(3)式となる。ただし、 D_0 は(4)式のようなガウス型ウィンドウを考える。なお $2m$ は結像領域の幅である。

このようなウィンドウがあると、一つの軸を通しては対象の一部についての結像しか得られず、そのような個々の像を複数重ね合せたものが多軸系の総合的な結像になる。対象が一つの点光源の場合の像は明らかに $(1+\beta)p_i$ の周期で繰り返される光点の列である。

$$g(\eta) = \sum_{i=-n}^n D_0(\eta - k_i) g_0(\eta - (1+\beta)k_i) \quad (3)$$

$$D_0(\eta) = \exp(-4.5\eta^2/m^2) \quad (4)$$

m はガウス分布の 3σ に相当する。

2.2 結像パターンの空間周波数スペクトル解析

(2)式の結像パターン $g^*(\eta)$ に関する空間周波数スペクトル $G^*(\nu)$ は、次式で与えられる。

$$G^*(\nu) = (2n+1)H(\nu|\nu)G_0(\nu) \quad (5)$$

また(3)式の結像パターン $g(\eta)$ に関する空間周波数スペクトル $G(\nu)$ は、畳み込み積分の形をした(6)式で与えられる。

$$\begin{aligned} G(\nu) &= \sum_{i=-n}^n \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-j2\pi k_i(\nu + \beta\nu')) Q_0(\nu - \nu') \\ &\quad \times G_0(\nu') d\nu' \\ &= (2n+1) \int_{-\infty}^{\infty} H(\nu|\nu') Q_0(\nu - \nu') G_0(\nu') d\nu' \end{aligned} \quad (6)$$

ここで $G_0(\nu)$, $Q_0(\nu)$ は、 $g_0(\eta)$ および $D_0(\eta)$ のフーリエ変換であり、 $Q_0(\nu)$ は次式で与えられる。

$$Q_0(\nu) = \sqrt{\pi m^2/4.5} \exp\{-\pi m \nu^2/4.5\} \quad (7)$$

また、 $H(\nu|\nu')$ は、多軸による繰り返しに基づくもので、光学系の倍率 β 、軸ピッチ p_i と軸の数 n をパラメータとし、(8)式で表わされ、(9)式の空間周波数のところで周期的に最大通過特性を示す。

さらに $Q_0(\nu - \nu')$ はウィンドウの幅 m をパラメータとし、 $\nu' = \nu$ にピークをもつ移動平均の機能を実現する。

$$H(\nu|\nu') = \frac{\sin[(2n+1)\pi(\nu + \beta\nu')p_i]}{(2n+1)\sin[\pi(\nu + \beta\nu')p_i]} \quad (8)$$

$$\nu' = \frac{k}{\beta p_i} - \frac{1}{\beta} \nu \quad (k=0, 1, 2, \dots) \quad (9)$$

3. 多軸平行光学系の機能と効果

3.1 移動平均機能と周期的強調効果

(6)式によれば、多軸平行光学系の導入により、 $G(\nu)$ は $G_0(\nu')$ に重み $H(\nu|\nu')$ をかけ、 $Q_0(\nu-\nu')$ による移動平均が施された形で定まるため、ねらいとする空間周波数成分 ν^* が元々のパターンに含まれず、 $G_0(\nu^*)=0$ であっても、その付近に何らかのパワー成分があれば、 $G(\nu^*)$ にはそれなりのパワー成分が現れることになる。

この点は、(5)式と(6)式を比較すればよくわかることで、空間周波数成分創出機能の原理をなすものであり、基本は $Q_0(\nu-\nu')$ による移動平均効果と $H(\nu|\nu')$ の特性に代表される多軸平行光学系の周期的強調効果にある。

この効果の様子を説明したものが Fig. 2(a), (b), (c), (d)であり、 ν の値の変化につれ、 $H(\nu|\nu')$ による重みの掛かり方と $Q_0(\nu-\nu')$ の移動平均の範囲がどう変わっていくかを示している。この場合、留意すべき点は、両者のピークがちょうど重なり合う ν の値がつぎの(10)式を満たすことで、この結果この空間周波数のところに大きな選択特性が現われる。

$$\nu_k = \frac{k}{(1+\beta)p_l} \quad (k=0, 1, 2, \dots) \quad (10)$$

また、Fig. 3 は、多軸平行光学系の空間周波数選択特性を調べるために $|G_0(\nu)|^2$ が一様の場合について計算した $|G(\nu)|^2$ の結果を示したものである。

Fig. 3(b)において、高いゲインを示す ν は多軸平行光学系の導入により作り出された空間周波数成分を意味し、それが(10)式の ν_k であることがわかる。ま

Fig. 2 Moving average function Q_0 and periodical emphasis function H

$n=10, \beta=0.5, m=1, p_l=1$

Fig. 3 The spatial frequency selectivity of MPOA

$n=10, \beta=0.5, m=1, p_l=1$

た、図の中に示す δ は空間周波数特性に関する半値幅であるが、この範囲は Q_0 と H の総合効果による移動平均の及ぶ範囲の目安である。

なお、ここでは $G_0(\nu)=1$ の場合についての結果を示しているが、 $G_0(\nu)$ の実数部と虚数部が ν についてゆっくり変動する場合 (ただし $|G_0(\nu)|^2=1$) でもほぼ同じ結果が得られることが判明している。

ただし、 $G_0(\nu)$ の実数部や虚数部が大きく変動する場合 (実際にその種の状況が発生する確率は少ない) には、移動平均により集められる成分の位相が異なり、ランダムであるため互いに相殺することもし、必ずしも Fig. 3(b) と同じような空間周波数成分創出特性や半値幅が得られるとは限らない。

3.2 欠損幅と空間周波数スペクトル成分創出条件

対象パターンに目的とする空間周波数成分が存在していない場合でも、多軸平行光学系の結像にはその成分が創出され、また移動平均の及ぶ範囲をより明確に確認するために行ったシミュレーション結果が Fig. 4 である。

Fig. 4(a) には、対象とするパターンについて空間周波数成分が欠損しているところが2カ所、欠損幅の大きさを変えて設定されている。これに対応させて図(b)を見ると、欠損の幅の程度が大きいものに対し、創出されたスペクトル成分に陥没した部分が現れており、空間周波数成分が完全に作り出されていないことがわかる。

この場合、Fig. 3(b) について述べた半値幅 δ を大きくし、移動平均の及ぶ範囲を広くするように、多軸光学系のパラメータ m, p_l, β を調整すれば、陥没する部分をなくすように改善できることは明らかで、逆にいえば、欠損の広がり幅がこの半値幅を越えないことが空間周波数成分を作り出せるための条件になる。

重み H と Q_0 による効果を総合した移動平均の及ぶ範囲を表す半値幅 δ が倍率 β の大きさに応じてどう変化するかを考察するため、3種類のウィンドウ

(a) Spatial frequency spectrum of an object pattern (b) Spatial frequency spectrum of the multi-projected pattern by MPOA

Fig. 4 The generation of new spatial frequency components $n=10$, $\beta=0.25$, $m=1$, $p_i=1$

Fig. 5 Half value width of spatial frequency selectivity vs magnification with three kinds of windows

(矩形ウィンドウ、三角ウィンドウとガウス型ウィンドウ)の場合につき $|G(\nu)|^2$ を計算し、その結果に基づき δ を求めたものが **Fig. 5** である。

図に見られるように、半値幅はいずれも β に対し単調に増加しており、対象パターンの空間周波数スペクトル欠損の幅を考慮して、光学系の倍率とレンズの視野角を調整・設計すれば、ある程度までの欠損幅をもつ対象について必要とする空間周波数成分を十分創出できることがわかる。

なお、計算では、視野角が一定な一般に存在するレンズを想定し、かつ実際に使用したレンズの視野角のデータを用いている。このようなことが現れるのは、多軸による周期的強調効果によるばかりでなく、レンズの不完全性 (m が有限) による移動平均との複合効果による点は興味深い。

3.3 多軸平行光学系の複合強調と同期協調効果

空間周波数成分の創出に関し、多軸光学系による周期的強調効果については、多軸の複合強調と位相同期協調の二つに分けて考えることができる。

Fig. 6 は、距離 p_i 隔たった2本の線光源 (またはスリット) を対象とする場合の多軸平行光学系の結像の様子を示すもので、レンズの視野の広さに関係し、同一の光軸によっては二つの結像が得られない場合 (a) $\beta p_i \geq 2m$ と、得られる場合 (b) $\beta p_i \leq 2m$ 、につ

(a) $\beta p_i \geq 2m$, $p_i = k_1(1+\beta)p_i$ (k_1 : integer)

(b) $\beta p_i \leq 2m$, $k_2\beta p_i = (1+\beta)p_i$ (k_2 : integer)

Fig. 6 The synchronous emphasis effect of MPOA

いて、それぞれの線光源に関する結像群と結像群間の位相関係が表わされている。

図に見られるように、一つの線光源に対する結像群にはすでに周期構造が現われる。これが多軸平行光学系の複合強調効果と呼ぶものであり、この場合のピッチは $(1+\beta)p_i$ である。

一方2組の結像群を統合的に眺めたとき、両者の位相が整合し、単一ピッチの周期構造をもつパターンに見える場合を同期協調の状態にあると呼ぶ。

このような同期協調が成立するための条件は、(a)、(b)それぞれの場合についてつぎの(11)、(12)式で与えられる。

$$p_i = k_1(1+\beta)p_i \quad (k_1 \text{ は整数}) \quad (11)$$

$$k_2\beta p_i = (1+\beta)p_i \quad (k_2 \text{ は整数}) \quad (12)$$

これらの結果を敷衍すると、ピッチ p_i で並んだ線光源の列を対象とする多軸光学系の結像については、多軸による複合強調と位相同期協調の2種類の効果が現われ、創出される空間周波数成分 ν は $[(1+\beta)p_i]^{-1}$ ばかりでなく、一般に次式で与えられることがわかる。

$$\nu = \frac{k_2}{k_1(1+\beta)p_i} \quad (k_1, k_2 \text{ は整数}) \quad (13)$$

4. レンチキュラーレンズによる 多軸平行光学系

具体的に多軸平行光学系を構成するために、以下に述べるような特性を有するレンチキュラーレンズを用いることとした。

4.1 レンチキュラーレンズのピッチの選定

前章までの解析により、多軸光学系を構成することによって、基本的に創出される空間周波数成分は、対象パターンに依存せず、軸のピッチ p_i とレンチキュラーレンズ (以下 LL と略記) の倍率 β を用いて $(1+\beta)p_i$ で与えられることがわかった。

この点、速度計測系のためには、ピッチ $p_s=(1+\beta)p_i$ の空間フィルタ検出器を多軸光学系の結像面上に設置すれば、出力には相対的に大きな振幅の信号が得られることになる。

4.2 レンチキュラーレンズの指向特性

LL の特性を定量的に調べるため Fig. 7 に示すような指向性モデルを想定した。

このモデルに基づき、LL の各パラメータを実験的に測定した結果、焦点距離 $f \approx 1.59$ mm、視野角度 $\phi \approx \pm 7$ 度、が得られた。

この場合、 ϕ の測定には、1本の細いスリットを観測対象とし、LL から対象までの距離 a を相対的に変化させ、これに対応して得られるスリットの結像の本数 N を調べる方法を探っている。その結果をまとめたものが Fig. 8 で、イメージセンサ、目視および拡大像の目視の3種類の方法により N の読み取りを行った結果が示されている。

いずれの測定方法に対しても a と N はほぼ直線関係をなし、 ϕ 一定という指向性モデルが妥当であることがわかる。

一方、幾何光学より Fig. 7 について、つぎの関係が成立する。

$$N \cdot p_i / 2 = a \cdot \tan \phi \quad (14)$$

$$N \cdot p_i / 2m = 1/\beta = a/b \quad (15)$$

Fig. 7 Directivity model of lenticular lens
 f : focal length, $\beta=b/a$: magnification

Fig. 8 Imaging characteristics of lenticular lens

$$1/a + 1/b = 1/f \quad (16)$$

これらの関係を整理すると

$$m = (1+\beta)f \cdot \tan \phi \quad (17)$$

の関係が得られる。つまり、同一のレンズを使用する範囲では ($f, \tan \phi$ を固定)、ウィンドウの幅 m は β と独立に決めることはできず、直線関係をもって一意的に決まる。なお、Fig. 8 のグラフの傾きにより、(14)式に関する、 $p_i/(2 \cdot \tan \phi)$ の値が与えられる。

他方、 β, p_i を固定して m の大きさが変えられる場合、 δ の広がりをも大きくする意味でスペクトル成分創

(a) Original letter

(b) Image letter ($a'=0.8$ mm, $N=3$)

(c) Image letter ($a'=2.8$ mm, $N=4$)

(d) Image letter ($a'=6.5$ mm, $N=6$)

Photo. 1 Images of a letter string by lenticular lens

a' : relative object distance

N : the number of the projected images of one slit line

出に有利な条件を考えてみると、 m が相対的に小さいほうが有利である傾向がある。これはそのほうが LL を構成する個々のレンズが投影する結像幅がより狭くなり（デルタ関数に近くなる）、そのことによって等価的にスペクトル幅が一様に広がった像が得られるためと考えられる。

4.3 レンチキュラーレンズによる結像

LL による結像のようすを **Photo. 1** に示す。元の文字列の像と、LL から対象までの距離を変えて得られた像が3通り示されている。距離を大きくするに従い、結像に現れる重なる像の数が増加し、結像領域の範囲幅が広がっているのが観察される。また、これに伴い、元のパターンにない特定な周期構造が結像に現れている。

5. 実験による検証

5.1 実験系の構成

特定な空間周波数成分が創出されることを検証するための実験系の概略を **Fig. 9** に示す。

図に関して、ラインセンサの受光部は1画素あたり $14 \times 300 \mu\text{m}^2$ の長方形で、直線上に2,048個の画素が配列され、長さ 28.6 mm の範囲のパターンを光電変換して取り込むことができる。また光学系には二つのマイクロ送り機構があり、LL からカメラの像面までの距離と、LL から LL の結像面までの距離が独立に変えられるように構成されている。この場合、LL の焦点距離が短いため、カメラレンズによる結像は LL 面からかなり接近した場所に作られる。なお、カメラレンズは適当な結像倍率をもつ非接触計測系構成の役割を果たす。さらに、波形観測装置兼 A/D 変換部として、デジタルストレージスコープを利用しており、サンプリング周波数 40 MHz で、1回2,048個のデータを捕足することができる。なお、パターンの空

Fig. 9 Experimental configuration for processing a projected pattern

間周波数スペクトル分析にはコンピュータによる高速フーリエ変換を利用した。

5.2 多軸平行光学系によるスリットの結像

Fig. 10 に示すものは、一本のスリットを多軸平行光学系で観測したとき、ラインセンサから得られた波形とその空間周波数スペクトル分析の結果である。

図に見られるように、多軸による複合的な強調効果として、距離が離れるに伴い、倍率に応じ $(1+\beta)p_i$ のピッチで繰り返す結像が得られていることが確認され、また LL のウィンドウ形が3種類のウィンドウの内ガウス型に近いことも観察される。

5.3 レンチキュラーレンズによる結像における位相同期性

つぎに、2本のスリットを対象とし、それらの間隔 p_i をだんだんと近づけつつ、結像における位相協調の性質を調べたものが **Fig. 11** である。

Fig. 10 Waveform of the images of one slit pattern and their spatial power spectrum (compound emphasis)

図に見られるように、距離 p_i により、強調されるべきピッチ $(1+\beta)p_i$ の空間周波数成分のパワーが大きいきと小さいときがある。

この場合、それぞれのスリットに関する結像群が得られているが、強い位相協調効果を生じる条件はその二つの結像群の間に、スリット像が現れる位置についての位相同期性があることと、両結像群間の全体的距離が接近していることである。

一番位相同期性が実現されている $p_i=3.0\text{ mm}$ のとき、強い同期協調効果が現れている。なおこの場合(13)式に関し、 $k_1=1$ 、 $k_2=4$ が満たされている。 $p_i=12.0\text{ mm}$ のときには、位相同期性は実現されているが、結像群の右端と左端に位置するスリット像が重なっており、両結像群間の全体的距離がやや離れている($k_1=4$ 、 $k_2=1$)。また、 $p_i=7.0\text{ mm}$ のときには、位相同期性が悪く、両結像群がほぼ $1/2$ ピッチずれた位置関係で重なっており($k_1=1$ 、 $k_2=3/2$)、このため2倍の高調波成分に大きなパワー成分が現れている。

Fig. 11 Waveform of the images of two slits pattern and their spatial power spectrum (synchronous emphasis)

5.4 レンチキュラーレンズによる空間周波数成分創出効果

Fig. 12, 13 は一般の空間パターンに対する多軸光学系の結像とそのスペクトル分析結果を示したものである。

いずれも(a)はLLを用いない元のパターンに関するデータで、(b)~(d)はLLの倍率を変えた場合の結果である。

どちらの図を見ても、(a)は広域にわたり広がりのあるスペクトルをもつことがわかる。このような場合、多軸平行光学系による空間周波数成分創出機能は特定空間周波数成分の強い強調効果として現れる。

すなわち(b)~(d)に見られるように、ここでは離散的スペクトルをもつパターンが得られており、多軸光学系により、特定な周期成分が強調されたパターンになっていることがわかる。

なお、この現象は β の値が小さく、多重に結像され

Fig. 12 Waveform of the images of an ordinary pattern (newspaper) and their spatial power spectrum

Fig. 13 Waveform of the images of a monochrome slits pattern and their spatial power spectrum

るパターンの数が多い場合のほうがより顕著なことも観察される。ただし、先に触れたように、この場合には $m/(\beta p_i)$ が大きくなり、移動平均の及ぶ範囲 θ は逆に狭くなるため、対象パターンに必要とする特定な空間周波数成分がないと、このような特定周期成分が十分得られるとは限らない。

6. おわりに

以上、光学系の複合化に基づく多軸平行光学系の構成方法を提案し、その結像パターンには、空間周波数成分が新たに創出されることを解析的に示すとともにそのことをシミュレーションと基礎的な実験系により検証した。

この場合、創出される空間周波数成分は $(1+\beta)p_i$ であり、多軸平行光学系による機能は、結像領域の有限性による移動平均の効果と多軸系の複合強調・同期協調効果の二つである。

なお、このような系を時間的操作により実現することは至難であり、並列処理性を有する空間的操作のもつ大きな特質と考えられる。

今後の課題としては、ここでの成果を考慮した、速度計測系など具体的空間フィルタリング系の実現を図り、そのための設計法を確立することなどである。

参考文献

- 1) 内藤, 狼, 小林: 空間フィルタ法による速度計測, 計測と制御, 7-11, 761/772 (1968)
- 2) 小林 彬: 空間フィルタとその応用 I, II, 計測と制御, 19-4, 409/417, 19-6, 571/580 (1980)
- 3) 小林 彬: 計測方程式, 計測と制御, 27-5, 11/16 (1988)
- 4) 森田, 山崎: 光学的方法による粗面の運動速度の非接触測定 ——可変型帯域通過空間フィルタ——, 東海大学学報, 195/202 (1977)
- 5) H. Yamasaki: An Adaptive Intelligent Velocity Sensing System, TRANSDUCERS '87, 137/142 (1987)
- 6) Y. Itakura, A. Sugimura and S. Tsutsumi: Amplitude-Modulated Reticle Constructed by a Liquid Crystal Cell Array, Appl. Opt., 20-16, 2819/2826 (1981)
- 7) 稲垣, 山浦, 小林: 可変性を有する空間フィルタ, 計測自動制御学会論文集, 23-6, 633/635 (1987)
- 8) 曹, 山浦, 小林: 多軸平行光学系を導入した空間フィルタによる速度計測, 第31回自動制御連合講演会前刷, 599/600 (1988)
- 9) 辻内順平: 光学概論 I, II, 朝倉書店 (1979)
- 10) M. Born and E. Wolf: Principles of Optics, Pergamon (1965)
- 11) 岡, 三橋, 山崎: 電子的に実現した柔軟性を有する空間フィルタ 可変性を有する空間フィルタ, 計測自動制御学会論文集, 25-3, 271/277 (1989)