

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5493191号
(P5493191)

(45) 発行日 平成26年5月14日(2014.5.14)

(24) 登録日 平成26年3月14日(2014.3.14)

(51) Int.Cl.

F I

G 0 6 T 5/20 (2006.01)
H 0 4 N 1/409 (2006.01)G O 6 T 5/20 B
H O 4 N 1/40 I O 1 D

請求項の数 22 (全 80 頁)

(21) 出願番号 特願2010-28278 (P2010-28278)
(22) 出願日 平成22年2月10日(2010.2.10)
(65) 公開番号 特開2011-165013 (P2011-165013A)
(43) 公開日 平成23年8月25日(2011.8.25)
審査請求日 平成25年2月1日(2013.2.1)

(73) 特許権者 803000115
学校法人東京理科大学
東京都新宿区神楽坂一丁目3番地
(74) 代理人 100105050
弁理士 鷲田 公一
(72) 発明者 田邊 造
東京都新宿区神楽坂1丁目3番地 学校法人東京理科大学内
(72) 発明者 古川 利博
東京都新宿区神楽坂1丁目3番地 学校法人東京理科大学内
(72) 発明者 長保 龍
長野県松本市寿南1-4-7

審査官 片岡 利延

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 画像復元装置および画像復元方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

モデル化可能な観測対象のシステムにおいて、原画像情報にばけおよび雑音が混在した劣化画像情報である観測信号のみから、前記原画像情報を駆動源として含む状態空間モデルに基づく予測法を用いて、前記原画像情報を推定する画像復元装置であって、

前記状態空間モデルは、復元対象である少なくとも1つ以上の注目画素と、前記注目画素の周辺の画素とを含む処理対象ブロックを処理単位として、前記処理対象ブロックを、時刻の変化に伴い同じ注目画素を含むように次の処理対象ブロックに移動させ、各時刻において前記処理対象ブロックに対応する観測量から前記処理対象ブロックの状態量を推定するように構成され、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 n までの観測信号により時刻 $n + 1$ での前記処理対象ブロックの状態量を推定した場合の推定誤差の相関値を算出する第1の相関演算部と、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、前記第1の相関演算部によって算出された相関値を用いて、時刻 $n + 1$ までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値と、時刻 n までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値と、時刻 $n + 1$ での観測信号を含む観測量の推定誤差と、の関係の規定するための重み係数を算出する重み係数算出部と、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 n までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値を算出する第1の最適推定値算出部と、

10

20

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、前記重み係数算出部によって算出された重み係数を用いて、時刻 $n + 1$ までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値を算出する第 2 の最適推定値算出部と、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 $n + 1$ までの観測信号により時刻 $n + 1$ での前記状態量を推定した場合の推定誤差の相関値を算出する第 2 の相関演算部と、

を有する画像復元装置。

【請求項 2】

前記状態空間モデルは、復元対象である注目画素と、前記注目画素の周辺の画素とを含む処理対象ブロックを処理単位として、前記処理対象ブロックに対応するすべての観測量から前記処理対象ブロックの状態量をすべて推定するように構成され、

前記第 1 の相関演算部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 n までの観測信号により前記原画像情報を含む時刻 $n + 1$ での前記処理対象ブロックの状態量を推定した場合の推定誤差ベクトルの相関値行列を算出し、

前記重み係数算出部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、前記第 1 の相関演算部によって算出された推定誤差ベクトルの相関値行列を用いて、時刻 $n + 1$ までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルと、時刻 n までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルと、時刻 $n + 1$ での観測信号を含む観測量の推定誤差ベクトルと、の関係を規定するための重み係数行列を算出し、

前記第 1 の最適推定値算出部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 n までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルを算出し、

前記第 2 の最適推定値算出部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、前記重み係数算出部によって算出された重み係数行列を用いて、時刻 $n + 1$ までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルを算出し、

前記第 2 の相関演算部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 $n + 1$ までの観測信号により時刻 $n + 1$ での前記状態量を推定した場合の推定誤差ベクトルの相関値行列を算出する、

請求項 1 記載の画像復元装置。

【請求項 3】

前記重み係数算出部は、

前記第 1 の相関演算部によって算出された推定誤差ベクトルの相関値行列、与えられた観測遷移行列、および与えられた観測雑音ベクトルの共分散行列を用いて、前記重み係数行列の算出を行う、

請求項 2 記載の画像復元装置。

【請求項 4】

前記第 1 の相関演算部は、

所定の状態遷移行列、与えられた駆動源ベクトルの共分散行列、および与えられたまたは前回前記第 2 の相関演算部によって算出された推定誤差ベクトルの相関値行列を用いて、前記推定誤差ベクトルの相関値行列の算出を行う、

請求項 2 記載の画像復元装置。

【請求項 5】

前記状態空間モデルは、復元対象である注目画素と、前記注目画素の周辺の画素とを含む処理対象ブロックを処理単位として、前記注目画素に対応する観測量から前記処理対象ブロックの状態量をすべて推定するように構成され、

前記第 1 の相関演算部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 n までの観測信号により前記原画像情報を含む時刻 $n + 1$ での前記処理対象ブロックの状態量を推定した場合の推定誤差ベクトルの相関

10

20

30

40

50

値行列を算出し、

前記重み係数算出部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、前記第 1 の相関演算部によって算出された推定誤差ベクトルの相関値行列を用いて、時刻 $n + 1$ までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルと、時刻 n までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルと、時刻 $n + 1$ での観測信号を含む観測量の推定誤差ベクトルと、の関係を規定するための重み係数ベクトルを算出し、

前記第 1 の最適推定値算出部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 n までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルを算出し、

前記第 2 の最適推定値算出部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、前記重み係数算出部によって算出された重み係数ベクトルを用いて、時刻 $n + 1$ までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルを算出し、

前記第 2 の相関演算部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 $n + 1$ までの観測信号により時刻 $n + 1$ での前記状態量を推定した場合の推定誤差ベクトルの相関値行列を算出する、

請求項 1 記載の画像復元装置。

【請求項 6】

前記重み係数算出部は、

前記第 1 の相関演算部によって算出された推定誤差ベクトルの相関値行列、与えられた観測遷移ベクトル、および与えられた観測雑音の相関値スカラーを用いて、前記重み係数ベクトルの算出を行う、

請求項 5 記載の画像復元装置。

【請求項 7】

前記第 1 の相関演算部は、

所定の状態遷移行列、与えられた駆動源ベクトルの共分散行列、および与えられたまたは前回前記第 2 の相関演算部によって算出された推定誤差ベクトルの相関値行列を用いて、前記推定誤差ベクトルの相関値行列の算出を行う、

請求項 5 記載の画像復元装置。

【請求項 8】

前記状態空間モデルは、復元対象である注目画素と、前記注目画素の周辺の画素とを含む処理対象ブロックを処理単位として、前記処理対象ブロックに含まれる所定の一部の領域内の観測量から、前記処理対象ブロックの状態量をすべて推定するように構成され、

前記第 1 の相関演算部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 n までの観測信号により前記原画像情報を含む時刻 $n + 1$ での前記処理対象ブロックの状態量を推定した場合の推定誤差ベクトルの相関値行列を算出し、

前記重み係数算出部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、前記第 1 の相関演算部によって算出された推定誤差ベクトルの相関値行列を用いて、時刻 $n + 1$ までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルと、時刻 n までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルと、時刻 $n + 1$ での観測信号を含む観測量の推定誤差ベクトルと、の関係を規定するための重み係数行列を算出し、

前記第 1 の最適推定値算出部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 n までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルを算出し、

前記第 2 の最適推定値算出部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、前記重み係数算出部によって算出された重み係数行列を用いて、時刻 $n + 1$ までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベ

10

20

30

40

50

クトルを算出し、

前記第 2 の相関演算部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 $n + 1$ までの観測信号により時刻 $n + 1$ での前記状態量を推定した場合の推定誤差ベクトルの相関値行列を算出する、

請求項 1 記載の画像復元装置。

【請求項 9】

前記重み係数算出部は、

前記第 1 の相関演算部によって算出された推定誤差ベクトルの相関値行列、与えられた観測遷移行列、および与えられた観測雑音ベクトルの共分散行列を用いて、前記重み係数行列の算出を行う、

請求項 8 記載の画像復元装置。

【請求項 10】

前記第 1 の相関演算部は、

所定の状態遷移行列、与えられた駆動源ベクトルの共分散行列、および与えられたまたは前回前記第 2 の相関演算部によって算出された推定誤差ベクトルの相関値行列を用いて、前記推定誤差ベクトルの相関値行列の算出を行う、

請求項 8 記載の画像復元装置。

【請求項 11】

前記所定の一部の領域は、前記注目画素に対応する観測量と、有色性駆動源の影響を受ける部分の観測量とを含む、請求項 8 記載の画像復元装置。

【請求項 12】

前記状態空間モデルは、復元対象である少なくとも 1 つの画素を含む注目画素領域と、前記注目画素領域の周辺の画素領域とを含む処理対象ブロックを処理単位として、前記処理対象ブロックに対応するすべての観測量から前記処理対象ブロックの状態量をすべて推定するように構成され、

前記第 1 の相関演算部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 n までの観測信号により前記原画像情報を含む時刻 $n + 1$ での前記処理対象ブロックの状態量を推定した場合の推定誤差ベクトルの相関値行列を算出し、

前記重み係数算出部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、前記第 1 の相関演算部によって算出された推定誤差ベクトルの相関値行列を用いて、時刻 $n + 1$ までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルと、時刻 n までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルと、時刻 $n + 1$ での観測信号を含む観測量の推定誤差ベクトルと、の関係の規定するための重み係数行列を算出し、

前記第 1 の最適推定値算出部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 n までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルを算出し、

前記第 2 の最適推定値算出部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、前記重み係数算出部によって算出された重み係数行列を用いて、時刻 $n + 1$ までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルを算出し、

前記第 2 の相関演算部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対して、時刻 $n + 1$ までの観測信号により時刻 $n + 1$ での前記状態量を推定した場合の推定誤差ベクトルの相関値行列を算出する、

請求項 1 記載の画像復元装置。

【請求項 13】

前記重み係数算出部は、

前記第 1 の相関演算部によって算出された推定誤差ベクトルの相関値行列、与えられた観測遷移行列、および与えられた観測雑音ベクトルの共分散行列を用いて、前記重み係数

10

20

30

40

50

行列の算出を行う、

請求項 1 2 記載の画像復元装置。

【請求項 1 4】

前記第 1 の相関演算部は、

所定の状態遷移行列、与えられた駆動源ベクトルの共分散行列、および与えられたまたは前回前記第 2 の相関演算部によって算出された推定誤差ベクトルの相関値行列を用いて、前記推定誤差ベクトルの相関値行列の算出を行う、

請求項 1 2 記載の画像復元装置。

【請求項 1 5】

前記状態空間モデルは、復元対象である少なくとも 1 つの画素を含む注目画素領域と、前記注目画素領域の周辺の画素領域とを含む処理対象ブロックを処理単位として、前記注目画素領域内のすべての観測量から前記処理対象ブロックの状態量をすべて推定するように構成され、

前記第 1 の相関演算部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 n までの観測信号により前記原画像情報を含む時刻 $n + 1$ での前記処理対象ブロックの状態量を推定した場合の推定誤差ベクトルの相関値行列を算出し、

前記重み係数算出部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、前記第 1 の相関演算部によって算出された推定誤差ベクトルの相関値行列を用いて、時刻 $n + 1$ までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルと、時刻 n までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルと、時刻 $n + 1$ での観測信号を含む観測量の推定誤差ベクトルと、の関係を規定するための重み係数行列を算出し、

前記第 1 の最適推定値算出部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 n までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルを算出し、

前記第 2 の最適推定値算出部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、前記重み係数算出部によって算出された重み係数行列を用いて、時刻 $n + 1$ までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルを算出し、

前記第 2 の相関演算部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 $n + 1$ までの観測信号により時刻 $n + 1$ での前記状態量を推定した場合の推定誤差ベクトルの相関値行列を算出する、

請求項 1 記載の画像復元装置。

【請求項 1 6】

前記重み係数算出部は、

前記第 1 の相関演算部によって算出された推定誤差ベクトルの相関値行列、与えられた観測遷移行列、および与えられた観測雑音ベクトルの共分散行列を用いて、前記重み係数行列の算出を行う、

請求項 1 5 記載の画像復元装置。

【請求項 1 7】

前記第 1 の相関演算部は、

所定の状態遷移行列、与えられた駆動源ベクトルの共分散行列、および与えられたまたは前回前記第 2 の相関演算部によって算出された推定誤差ベクトルの相関値行列を用いて、前記推定誤差ベクトルの相関値行列の算出を行う、

請求項 1 5 記載の画像復元装置。

【請求項 1 8】

前記状態空間モデルは、復元対象である少なくとも 1 つの画素を含む注目画素領域と、前記注目画素領域の周辺の画素領域とを含む処理対象ブロックを処理単位として、前記処理対象ブロックに含まれる所定の一部の画素領域内の観測量から、前記処理対象ブロック

10

20

30

40

50

の状態量をすべて推定するように構成され、

前記第 1 の相関演算部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 n までの観測信号により前記原画像情報を含む時刻 $n + 1$ での前記処理対象ブロックの状態量を推定した場合の推定誤差ベクトルの相関値行列を算出し、

前記重み係数算出部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、前記第 1 の相関演算部によって算出された推定誤差ベクトルの相関値行列を用いて、時刻 $n + 1$ までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルと、時刻 n までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルと、時刻 $n + 1$ での観測信号を含む観測量の推定誤差ベクトルと、の関係を規定するための重み係数行列を算出し、

10

前記第 1 の最適推定値算出部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 n までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルを算出し、

前記第 2 の最適推定値算出部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、前記重み係数算出部によって算出された重み係数行列を用いて、時刻 $n + 1$ までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値ベクトルを算出し、

前記第 2 の相関演算部は、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 $n + 1$ までの観測信号により時刻 $n + 1$ での前記状態量を推定した場合の推定誤差ベクトルの相関値行列を算出する、

20

請求項 1 記載の画像復元装置。

【請求項 19】

前記重み係数算出部は、

前記第 1 の相関演算部によって算出された推定誤差ベクトルの相関値行列、与えられた観測遷移行列、および与えられた観測雑音ベクトルの共分散行列を用いて、前記重み係数行列の算出を行う、

請求項 18 記載の画像復元装置。

【請求項 20】

前記第 1 の相関演算部は、

所定の状態遷移行列、与えられた駆動源ベクトルの共分散行列、および与えられたまたは前回前記第 2 の相関演算部によって算出された推定誤差ベクトルの相関値行列を用いて、前記推定誤差ベクトルの相関値行列の算出を行う、

請求項 18 記載の画像復元装置。

【請求項 21】

前記所定の一部の画素領域は、前記注目画素領域内の観測量と、有色性駆動源の影響を受ける部分の観測量とを含む、請求項 18 記載の画像復元装置。

【請求項 22】

モデル化可能な観測対象のシステムにおいて、原画像情報にぼけおよび雑音が混在した劣化画像情報である観測信号のみから、前記原画像情報を駆動源として含む状態空間モデルに基づく予測法を用いて、前記原画像情報を推定する画像復元方法であって、

40

前記状態空間モデルは、復元対象である少なくとも 1 つ以上の注目画素と、前記注目画素の周辺の画素とを含む処理対象ブロックを処理単位として、前記処理対象ブロックを、時刻の変化に伴い同じ注目画素を含むように次の処理対象ブロックに移動させ、各時刻において前記処理対象ブロックに対応する観測量から前記処理対象ブロックの状態量を推定するように構成され、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 n までの観測信号により時刻 $n + 1$ での前記処理対象ブロックの状態量を推定した場合の推定誤差の相関値を算出する第 1 の相関演算工程と、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、前記第 1 の相関演算工程で算出した相関値を用いて

50

、時刻 $n + 1$ までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値と、時刻 n までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値と、時刻 $n + 1$ での観測信号を含む観測量の推定誤差と、の関係を規定するための重み係数を算出する重み係数算出工程と、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 n までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値を算出する第 1 の最適推定値算出工程と、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、前記重み係数算出工程で算出した重み係数を用いて、時刻 $n + 1$ までの観測信号による時刻 $n + 1$ での前記状態量の最適推定値を算出する第 2 の最適推定値算出工程と、

時刻 $n + 1$ のみの観測信号に対し、時刻 $n + 1$ までの観測信号により時刻 $n + 1$ での前記状態量を推定した場合の推定誤差の相関値を算出する第 2 の相関演算工程と、

を有する画像復元方法。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、画像復元装置および画像復元方法に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、画像工学の分野において、劣化した画像から原画像を復元する技術の研究開発が多くなされている。すなわち、原画像（所望情報、クリアな画像）に不必要な情報（ぼけと雑音）が混在した劣化画像（受信情報）から不必要な情報（ぼけと雑音）を取り除き、原画像（所望情報）のみを抽出することは、画像復元の分野において必要不可欠な技術であり、近年盛んに研究開発が行われている。例えば、デジタルカメラ（デジタルスチルカメラおよびデジタルビデオカメラの総称）や携帯電話などで撮影された画像は、手ぶれや焦点ずれなどに起因する「ぼけ」と、暗電流や熱雑音などに起因するガウス性またはインパルス性の「雑音」との影響から、実物と比較して画質が劣化することは避けられない。「画像復元」とは、このように劣化した画像からできるだけ原画像に近い画像を復元することである。

20

【0003】

現在一般に市場で普及している画像復元技術の多くは、例えば、手ぶれ補正や顔認識、色補正、様々なフィルタなどを用いて、予めぼけと雑音の影響を軽減させる予防的な技術が主流となっている。この結果、近年、特にデジタルカメラの分野では、デジタルカメラの多機能化・高性能化により鮮明な画像が気軽に手に入れられるようになってきている。

30

【0004】

しかし、これらの予防的な技術は、何度も画像を撮り直せる状況下では問題ないが、古文書などの既に劣化している画像や、スポーツや医療などの分野における瞬間的に変化する画像など、撮り直しが許されない画像に対する復元は、いまだ困難な問題である。ここで、スポーツと医療の分野における瞬間的に変化する画像は、例えば、選手の瞬間的な動作や、肺や心臓などの臓器の瞬間的な様子などである。したがって、今日、特に、撮り直しが許されない状況下における画像復元の重要性が高まってきている。

40

【0005】

撮り直しが許されない状況下における従来の画像復元技術として、ウィナーフィルタ（Wiener Filter）を用いた画像復元手法が広く知られている（非特許文献 1、非特許文献 2）。この手法は、フィルタを通して得られる復元画像と原画像との平均 2 乗誤差を最小にするフィルタであって、最小 2 乗フィルタとも呼ばれている。この手法は、周波数領域で処理を行うため、確率過程の定常性と半無限長の画像のサイズとを前提にした画像復元手法である。

【0006】

また、他の画像復元技術として、射影フィルタを用いた画像復元手法も知られている（

50

非特許文献3、非特許文献4)。射影フィルタは、原画像と復元画像との近さを直接原画像の空間で評価しており、復元画像の雑音の画像成分が個々の原画像の最良近似、つまり、個々の原画像の正射影となるものの中で、復元画像の雑音成分の2乗平均を最小にするものである。また、この性質から、射影フィルタは、出現頻度に無関係に、最良近似画像を復元する手法である。

【0007】

また、さらに他の画像復元技術として、カルマンフィルタ(Kalman Filter)を用いた画像復元手法も知られている(非特許文献5、非特許文献6)。この手法は、まずステップ1で、劣化画像を用いて原画像のAR(Auto Regressive: 自己回帰)システムのパラメータ(以下「AR係数」という)を推定した後、ステップ2で、ステップ1で推定したAR係数を用いて状態空間モデル(状態方程式と観測方程式)を構成し、これにカルマンフィルタ理論(カルマンフィルタアルゴリズム)を適用することによって、高性能な画像復元を実現している。さらには、このような2段階処理を行うカルマンフィルタを2次元カルマンフィルタに拡張した画像復元手法も知られている(非特許文献7、非特許文献8)。この手法は、2次元に拡張した状態空間モデルを用いて、劣化画像を復元するカルマンフィルタを実現している。なお、非特許文献7および非特許文献8に示す2次元カルマンフィルタと区別するため、適宜、非特許文献5および非特許文献6に示すカルマンフィルタを「1次元カルマンフィルタ」と称する。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0008】

【非特許文献1】西宮亮平、外1名、「複数のウィーナーフィルタによる画像復元」(Image Restoration by Using Multiple Wiener Filters)、電子情報通信学会論文誌、A、Vol. J83-A、No. 7、pp. 892-902、2000年7月

【非特許文献2】山根延元、外3名、「画像の局所定常ガウス混合モデルに基づく適応的ウィーナーフィルタを用いた最適雑音除去」(An Optimal Noise Removal Using Adaptive Wiener Filter Based on Locally Stationary Gaussian Mixture Distribution Model for Images)、電子情報通信学会論文誌、A、Vol. J85-A、No. 9、pp. 993-1004、2002年9月

【非特許文献3】小川 英光、外1名、「部分射影フィルタの諸性質」(Properties of Partial Projection Filter)、電子情報通信学会論文誌、A、Vol. J71-A、No. 2、pp. 527-534、1988年2月

【非特許文献4】小出 裕司、外2名、「信号・画像推定のための射影フィルタ族の統一理論」(A Unified Theory of the Family of Projection Filters for Signal and Image Estimation)、電子情報通信学会論文誌、D-II、Vol. J77-D-II、No. 7、pp. 1293-1301、1994年7月

【非特許文献5】城崇、外2名、「カルマンフィルタによる高精度画像復元のための画像のモデリングとパラメータ推定」(Image Modeling and Parameter Identification for Image Restoration Using a Kalman Filter)、電子情報通信学会論文誌、D-II、Vol. J80-D-II、No. 11、pp. 2912-2919、1997年11月

【非特許文献6】松村淳、外2名、「効果的な雑音除去のための適応的な画像のモデル化によるカルマンフィルタ」(A Kalman Filter Using Adaptive Image Modeling for Noise Reduction)、電子情報通信学会論文誌、D-II、Vol. J86-D-II、No. 2、pp. 212-222、2003年2月

【非特許文献7】Mahmood R Azimi-Sadjadi and Ping Wong, "Two-Dimensional Block Kalman Filtering for Image Restoration," IEEE Trans. On Signal Process, vol. ASSP-35, no.12, Dec. 1987

【非特許文献8】Stuart Citrin and Mahmood R. Azimi-Sadjadi, "A Full-Plane Block Kalman Filter for Image Restoration," IEEE Trans. on Image Processing, vol.1, no. 4, Oct. 1992

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

しかしながら、ウィナーフィルタを用いた画像復元手法は、画像の劣化状態によらず復元が可能であるという利点を有する反面、非定常性（画像の分散が変化していること）が強い自然画像（加工されていない撮影されたままの画像）に対する復元精度が低いという欠点がある。

【0010】

すなわち、ウィナーフィルタを用いた画像復元手法は、上記のように、周波数領域で処理を行うため、確率過程の定常性と半無限長の画像のサイズとを前提にしているが、現実には、実環境においてこの前提条件が成り立つことは困難であるため、適切に復元されない場合が存在する（自然画像の非定常性の問題）。また、この手法は、最小2乗誤差を評価量とした一括処理であるため、復元画像にぼけが残るという問題が生じる可能性もある（評価量の問題）。

【0011】

具体的には、ウィナーフィルタを用いた画像復元手法では、画像の出現頻度が低くなると、復元精度が低下する、つまり、画像においては、出現頻度が低いエッジ部分の復元に影響するという問題がある。換言すれば、例えば、カメラで撮影された画像は、エッジ部分が多く非定常性が強いいため、特にエッジ部分において最適に復元できないという問題がある。ただし、階調や色などが変化していない、つまり、画像の分散が変化していない、単調な背景部分などは、定常性が強いいため、通常、良好な復元精度を得ることができる。

【0012】

また、カルマンフィルタを用いた画像復元手法は、ウィナーフィルタを用いた画像復元手法の問題点（自然画像の非定常性の問題と評価量の問題）を解決するための手法であって、ウィナーフィルタを用いた画像復元手法の問題点を解決可能であるという利点を有する反面、処理対象画像（観測画像・劣化画像）にぼけに基づく劣化があると、復元精度が低いという問題がある。

【0013】

すなわち、カルマンフィルタを用いた画像復元手法は、ステップ1で、注目画素とその周囲の画素との相関を考慮すべく、前処理として注目画素とその周囲の画素に対して原画像のAR係数を推定した後、ステップ2で、ステップ1で推定したAR係数を用いて状態空間モデル（状態方程式と観測方程式）を構成し、具体的には、ステップ1で推定したAR係数と原画像から状態方程式を構成し、原画像とぼけ関数と雑音から観測方程式を構成することにより、カルマンフィルタ理論（カルマンフィルタアルゴリズム）を用いて画像を復元している。したがって、カルマンフィルタを用いた画像復元手法は、定常性を前提としない時間領域のみの処理であり、かつ、推定誤差の分散を評価量とする逐次的処理であるため、ウィナーフィルタを用いた画像復元手法の問題点を解決することができる。なお、このような2段階処理を必要とする点は、1次元カルマンフィルタを用いた手法も2次元カルマンフィルタを用いた手法も同様である。

【0014】

しかしながら、一方で、カルマンフィルタを用いた手法は、1次元カルマンフィルタであれ2次元カルマンフィルタであれ、ステップ1で推定したAR係数を用いてステップ2のカルマンフィルタアルゴリズムを実行するため、ステップ1でのAR係数の推定精度に劣化画像の復元精度が大きく依存してしまうという問題を有している（ARシステムの問題）。例えば、デジタルカメラの場合、処理対象画像にぼけ（焦点ずれなど）に基づく劣化が含まれると、ステップ1でのAR次数の決定およびAR係数の推定が困難となるため、ステップ2でのカルマンフィルタによる画像復元の精度に影響が出てしまう。

【0015】

この点、一般には、AR係数の正確な推定は困難である。AR係数の正確な推定は、例えば、画像復元であれば、クリアな画像（原画像）に依存しているからである。このこと

10

20

30

40

50

は、原画像が既知でなければならないことを意味しているため、リアルタイム処理は困難となる。また、仮に何らかの手法でリアルタイムにAR係数を正確に推定することが可能になったとしても、処理が増加するため演算量の問題は避けられない。また、そもそも、AR係数の推定はAR係数の次数を決定した後に行われるが、AR係数の次数を決定するのは非常に困難であり、この点からもAR係数の正確な推定は困難であるといえる。

【0016】

したがって、今日、ウィナーフィルタを用いた画像復元手法の問題点およびカルマンフィルタを用いた画像復元手法の問題点の両方を解決しうる、シンプルで実用的な高性能の画像復元手法、つまり、シンプルな構成を有し、かつ、実環境でも使用可能であり、しかも劣化画像の復元性能（つまり、画像復元能力）が高い画像復元手法が求められている。特に、劣化画像の復元性能（画像復元能力）としては、クリアな画像にぼけと雑音が含まれた劣化画像に対して、ぼけと雑音を同時に取り除くことができる高い性能（能力）が求められている。

10

【0017】

本発明の目的は、ぼけと雑音を同時に除去することができる高い画像復元能力を実現することができるシンプルで実用的な画像復元装置および画像復元方法を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0018】

本発明の画像復元装置は、原画像情報に不必要な情報が混在した劣化画像情報のみから前記原画像情報を推定する画像復元装置であって、時刻 n のみの劣化画像情報に対して、時刻 n または時刻 $n+1$ までの情報により前記原画像情報を含む時刻 $n+1$ でのシステムの状態量を推定した場合の推定誤差の相関値を算出する相関演算部と、時刻 n のみの劣化画像情報に対して、前記相関演算部によって算出された相関値を用いて、時刻 $n+1$ までの情報による時刻 $n+1$ での前記状態量の最適推定値と、時刻 n までの情報による時刻 $n+1$ での前記状態量の最適推定値と、前記劣化画像情報を含む観測量の推定誤差と、の関係を規定するための重み係数を算出する重み係数算出部と、時刻 n のみの劣化画像情報に対して、前記重み係数算出部によって算出された重み係数を用いて、時刻 n または時刻 $n+1$ までの情報による時刻 $n+1$ での前記状態量の最適推定値を算出する最適推定値算出部と、を有する構成を採る。

20

30

【0019】

本発明の画像復元方法は、原画像情報に不必要な情報が混在した劣化画像情報のみから前記原画像情報を推定する画像復元方法であって、時刻 n のみの劣化画像情報に対して、時刻 n または時刻 $n+1$ までの情報により前記原画像情報を含む時刻 $n+1$ でのシステムの状態量を推定した場合の推定誤差の相関値を算出する相関演算工程と、時刻 n のみの劣化画像情報に対して、前記相関演算工程で算出した相関値を用いて、時刻 $n+1$ までの情報による時刻 $n+1$ での前記状態量の最適推定値と、時刻 n までの情報による時刻 $n+1$ での前記状態量の最適推定値と、前記劣化画像情報を含む観測量の推定誤差と、の関係を規定するための重み係数を算出する重み係数算出工程と、時刻 n のみの劣化画像情報に対して、前記重み係数算出工程で算出した重み係数を用いて、時刻 n または時刻 $n+1$ までの情報による時刻 $n+1$ での前記状態量の最適推定値を算出する最適推定値算出工程と、を有するようにした。

40

【発明の効果】

【0020】

本発明によれば、ぼけと雑音を同時に除去することができる高い画像復元能力を実現することができるシンプルで実用的な画像復元装置および画像復元方法を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【0021】

【図1】本発明の実施の形態1に係る画像復元装置の構成を示すブロック図

50

【図 2】(A) は、図 1 の画像復元処理部の構成を示すブロック図、(B) は、図 2 (A) の第 1 復元処理部の構成を示すブロック図

【図 3】画像の劣化の過程を説明するための図

【図 4】発明手法 1 の状態空間モデルのシステム構成を表すブロック線図

【図 5】発明手法 1 の状態方程式の定式化の具体例を説明するための図であり、特に、(A) は、状態空間モデルの状態過程を示す図、(B) は、処理対象ブロックおよびその時間変化の一例を示す図、(C) は、状態方程式の具体例を示す図

【図 6】発明手法 1 の状態方程式の構成を説明するための図

【図 7】発明手法 1 の観測方程式の定式化の具体例を説明するための図であり、特に、(A) は、状態空間モデルの観測過程を示す図、(B) は、観測方程式の具体例を示す図

【図 8】従来一般的な観測方程式の構成（一般例）を説明するための図であり、特に、(A) は、従来の観測方程式の定義を示す図、(B) は、観測量に影響する状態量の範囲を視覚的に示す図

【図 9】発明手法 1 の観測方程式の構成を説明するための図であり、特に、(A) は、発明手法 1 の観測方程式の定義を示す図、(B) は、観測量に影響する状態量の範囲を視覚的に示す図

【図 10】観測遷移行列を構成する係数の割り当て方法を説明するための図

【図 11】図 9 (A) に示す観測遷移行列に基づく、各観測量に影響する状態量の範囲を、割り当てられた係数と共に示す図

【図 12】発明手法 1 のアルゴリズムの一例を示す図

【図 13】図 12 のアルゴリズムを実行する処理手順を示すフローチャート

【図 14】発明手法 1 を視覚的にまとめた説明図

【図 15】シミュレーション条件を説明するための図

【図 16】原画像「カメラマン」を説明するための図

【図 17】従来手法との対比において原画像「カメラマン」に対する発明手法 1 のシミュレーション結果（視覚評価）を示す図

【図 18】図 17 中の破線の円の周辺領域を拡大した図

【図 19】図 17 と同様のシミュレーション結果（視覚評価）を示す図

【図 20】図 19 中の破線の円の周辺領域を拡大した図

【図 21】従来手法との対比において原画像「レナ」に対する発明手法 1 のシミュレーション結果（視覚評価）を示す図

【図 22】図 21 中の破線の円の周辺領域を拡大した図

【図 23】従来手法との対比において原画像に対する発明手法 1 のシミュレーション結果（客観評価）を示す図

【図 24】従来手法との対比において原画像に対する発明手法 1 のシミュレーション結果（主観評価）を示す図

【図 25】図 1 の画像復元装置の動作の一例を示すフローチャート

【図 26】図 25 のステップ S 2 3 0 0 の検出方法の一例を説明するための図

【図 27】復元モードの実装の一例を説明するための図

【図 28】復元モードの実装の他の例を説明するための図

【図 29】劣化画像モデルを視覚的に説明するための図

【図 30】発明手法 1 の状態空間モデルを視覚的に説明するための図

【図 31】発明手法 1 の状態過程を視覚的に説明するための図

【図 32】発明手法 1 の観測過程を視覚的に説明するための図

【図 33】発明手法 1 の状態方程式と観測方程式をまとめて示す説明図

【図 34】発明手法 1 のアルゴリズムを説明するための図

【図 35】図 34 のアルゴリズムを実行する処理手順を示すフローチャート

【図 36】発明手法 1 の課題を視覚的に説明するための図

【図 37】発明手法 2 の状態方程式の構成を視覚的に示す説明図であり、特に、(A) は、発明手法 1 の状態方程式の具体例を示す図、(B) は、時刻の変化に伴う処理対象プロ

10

20

30

40

50

ックの変化を示す図

- 【図 3 8】 発明手法 2 の観測方程式の構成を視覚的に示す説明図
- 【図 3 9】 発明手法 2 の観測方程式の構成を視覚的に示す他の説明図
- 【図 4 0】 発明手法 2 の状態方程式と観測方程式をまとめて示す説明図
- 【図 4 1】 発明手法 2 のアルゴリズムを説明するための図
- 【図 4 2】 図 4 1 のアルゴリズムを実行する処理手順を示すフローチャート
- 【図 4 3】 発明手法 1 と発明手法 2 のアルゴリズムを比較した説明図
- 【図 4 4】 発明手法 2 の演算量評価を説明するための図
- 【図 4 5】 発明手法 2 の復元処理速度評価を説明するための図
- 【図 4 6】 シミュレーション条件を説明するための図 10
- 【図 4 7】 比較対象手法との対比において原画像「カメラマン」に対する発明手法 2 のシミュレーション結果（視覚評価）を示す図
- 【図 4 8】 図 4 7 中の破線の円の周辺領域を拡大した図
- 【図 4 9】 比較対象手法との対比において原画像「レナ」に対する発明手法 2 のシミュレーション結果（視覚評価）を示す図
- 【図 5 0】 図 4 9 中の破線の円の周辺領域を拡大した図
- 【図 5 1】 比較対象手法との対比において原画像に対する発明手法 2 のシミュレーション結果（客観評価）を示す図
- 【図 5 2】 発明手法 2 の課題を視覚的に説明するための図
- 【図 5 3】 発明手法 3 の観測方程式の構成を視覚的に示す説明図 20
- 【図 5 4】 発明手法 3 の状態空間モデルを視覚的に説明するための図
- 【図 5 5】 発明手法 3 の状態方程式と観測方程式をまとめて示す説明図
- 【図 5 6】 発明手法 3 のアルゴリズムを説明するための図
- 【図 5 7】 図 5 6 のアルゴリズムを実行する処理手順を示すフローチャート
- 【図 5 8】 発明手法 3 の演算量評価を説明するための図
- 【図 5 9】 発明手法 3 の復元処理速度評価を説明するための図
- 【図 6 0】 比較対象手法との対比において原画像「カメラマン」に対する発明手法 3 のシミュレーション結果（視覚評価）を示す図
- 【図 6 1】 図 6 0 中の破線の円の周辺領域を拡大した図
- 【図 6 2】 比較対象手法との対比において原画像「レナ」に対する発明手法 3 のシミュレーション結果（視覚評価）を示す図 30
- 【図 6 3】 図 6 2 中の破線の円の周辺領域を拡大した図
- 【図 6 4】 比較対象手法との対比において原画像に対する発明手法 3 のシミュレーション結果（客観評価）を示す図
- 【図 6 5】 1 次元の画像復元手法の特徴を説明するための図
- 【図 6 6】 2 次元の画像復元手法の特徴を説明するための図
- 【図 6 7】 発明手法 4 の状態空間モデルを視覚的に説明するための図
- 【図 6 8】 発明手法 4 の状態過程を視覚的に説明するための図
- 【図 6 9】 発明手法 4 の状態方程式の構成を視覚的に示す説明図
- 【図 7 0】 発明手法 4 の観測過程を視覚的に説明するための図 40
- 【図 7 1】 発明手法 4 の観測方程式の構成を視覚的に示す説明図
- 【図 7 2】 発明手法 4 の観測遷移行列の具体例を示す図
- 【図 7 3】 図 7 2 の観測遷移行列の構成を視覚的に示す説明図
- 【図 7 4】 図 7 2 の観測遷移行列を構成する係数の割り当て方法の具体例を示す図
- 【図 7 5】 図 7 2 の観測遷移行列を構成する係数の割り当て方法の具体例を示す他の図
- 【図 7 6】 図 7 2 の観測遷移行列を構成する係数の割り当て方法の具体例を示すさらに他の図
- 【図 7 7】 発明手法 4 の状態方程式と観測方程式をまとめて示す説明図
- 【図 7 8】 発明手法 4 のアルゴリズムを説明するための図
- 【図 7 9】 図 7 8 のアルゴリズムを実行する処理手順を示すフローチャート 50

【図 8 0】	発明手法 4 の演算量評価を説明するための図	
【図 8 1】	発明手法 4 の復元処理速度評価を説明するための図	
【図 8 2】	比較対象手法との対比において原画像「カメラマン」に対する発明手法 4 のシミュレーション結果（視覚評価）を示す図	
【図 8 3】	図 8 2 中の破線の円の周辺領域を拡大した図	
【図 8 4】	比較対象手法との対比において原画像「レナ」に対する発明手法 4 のシミュレーション結果（視覚評価）を示す図	
【図 8 5】	図 8 4 中の破線の円の周辺領域を拡大した図	
【図 8 6】	比較対象手法との対比において原画像に対する発明手法 4 のシミュレーション結果（客観評価）を示す図	10
【図 8 7】	発明手法 4 の課題を視覚的に説明するための図	
【図 8 8】	発明手法 5 の状態方程式の構成を視覚的に示す説明図であり、特に、（ A ）は、発明手法 4 の状態方程式の具体例を示す図、（ B ）は、時刻の変化に伴う処理対象ブロックの変化を示す図	
【図 8 9】	発明手法 5 の観測方程式の構成を視覚的に示す説明図	
【図 9 0】	発明手法 5 の観測方程式の構成を視覚的に示す他の説明図	
【図 9 1】	発明手法 5 の状態方程式と観測方程式をまとめて示す説明図	
【図 9 2】	発明手法 5 のアルゴリズムを説明するための図	
【図 9 3】	図 9 2 のアルゴリズムを実行する処理手順を示すフローチャート	
【図 9 4】	発明手法 4 と発明手法 5 のアルゴリズムを比較した説明図	20
【図 9 5】	発明手法 5 の演算量評価を説明するための図	
【図 9 6】	発明手法 5 の復元処理速度評価を説明するための図	
【図 9 7】	比較対象手法との対比において原画像「カメラマン」に対する発明手法 5 のシミュレーション結果（視覚評価）を示す図	
【図 9 8】	図 9 7 中の破線の円の周辺領域を拡大した図	
【図 9 9】	比較対象手法との対比において原画像「レナ」に対する発明手法 5 のシミュレーション結果（視覚評価）を示す図	
【図 1 0 0】	図 9 9 中の破線の円の周辺領域を拡大した図	
【図 1 0 1】	比較対象手法との対比において原画像に対する発明手法 5 のシミュレーション結果（客観評価）を示す図	30
【図 1 0 2】	発明手法 5 の課題を視覚的に説明するための図	
【図 1 0 3】	発明手法 6 の観測方程式の構成を視覚的に示す説明図	
【図 1 0 4】	発明手法 6 の状態空間モデルを視覚的に説明するための図	
【図 1 0 5】	発明手法 6 の状態方程式と観測方程式をまとめて示す説明図	
【図 1 0 6】	発明手法 6 のアルゴリズムを説明するための図	
【図 1 0 7】	図 1 0 6 のアルゴリズムを実行する処理手順を示すフローチャート	
【図 1 0 8】	発明手法 6 の演算量評価を説明するための図	
【図 1 0 9】	発明手法 6 の復元処理速度評価を説明するための図	
【図 1 1 0】	比較対象手法との対比において原画像「カメラマン」に対する発明手法 6 のシミュレーション結果（視覚評価）を示す図	40
【図 1 1 1】	図 1 1 0 中の破線の円の周辺領域を拡大した図	
【図 1 1 2】	比較対象手法との対比において原画像「レナ」に対する発明手法 6 のシミュレーション結果（視覚評価）を示す図	
【図 1 1 3】	図 1 1 2 中の破線の円の周辺領域を拡大した図	
【図 1 1 4】	比較対象手法との対比において原画像に対する発明手法 6 のシミュレーション結果（客観評価）を示す図	
【図 1 1 5】	本発明の実施の形態 2 に係る画像復元装置の構成を示すブロック図	
【図 1 1 6】	図 1 1 5 の復元モード指定部によって指定可能な復元モードの具体例を示す図	
【図 1 1 7】	図 1 1 5 の画像復元装置の動作の一例を示すフローチャート	50

【発明を実施するための形態】**【0022】**

以下、本発明の実施の形態について、図面を参照して詳細に説明する。

【0023】

(実施の形態1)

図1は、本発明の実施の形態1に係る画像復元装置の構成を示すブロック図である。ここでは、本発明の画像復元方法を適用した好適な画像復元装置について、特に各種の用途に対応可能な汎用的な画像復元装置を例にとって説明する。

【0024】

図1に示す画像復元装置100は、コンピュータで構成されており、大別して、画像入力装置110、入力インタフェース部120、操作部130、内部インタフェース部140、記憶部150、画像復元処理部160、出力インタフェース部170、および画像出力装置180を有する。

【0025】

画像入力装置110は、復元処理の対象となる画像データ(劣化画像)をデジタルデータとしてコンピュータに入力するための入力装置である。入力する画像は、静止画像でも動画画像でもよい。画像入力装置110としては、例えば、カメラ112やスキャナ114、記録メディア116、モデム118などを用いることができる。カメラ112は、撮像機能を有するすべての装置を意味し、例えば、デジタルカメラ(デジタルスチルカメラとデジタルビデオカメラ)のほかに、カメラ機能を搭載した携帯電話や、防犯カメラ(監視カメラ)、画像診断を行うための医療機器(内視鏡、レントゲン、エコー、CT、MRIなど)などを含むことができる。スキャナ114は、代表的な画像入力装置の1つであり、ネガやポジといったファイルからの読み込みを専用に行うフィルムスキャナなども含んでいる。記録メディア116は、画像データを記録可能な記録媒体を広く意味し、例えば、磁気ディスク(HDDやFDなど)や、光ディスク(CDやDVD、BDなど)、光磁気ディスク(MO)、フラッシュメモリ(メモリカードやUSBメモリなど)などである。モデム118は、外部の通信ネットワーク(例えば、電話回線やLAN、インターネットなど)と接続するための装置である。なお、画像入力装置110の種類は、画像復元装置100の用途に応じて適宜選択すればよい。

【0026】

入力インタフェース部120は、画像入力装置110から提供される画像データをコンピュータで処理可能なデータ形式に変換するなどの入力処理を行う。図示しないが、入力インタフェース部120は、画像入力装置110の種類に応じて別個独立に設けられる。例えば、記録メディア116の入力インタフェース部120は、ドライブとも呼ばれ、記録メディア116の種類に応じて様々な種類のドライブが使用可能である。なお、ドライブは、記録メディアを読み書きする装置であり、記録メディアに関する限り、通常は、入力インタフェース部120と出力インタフェース部170は一体化されている。また、通常、モデム118は、画像入力装置110としても画像出力装置180としても機能しうるため、モデム118に関しても、通常、入力インタフェース部120と出力インタフェース部170は一体化されている。入力インタフェース部120は、コンピュータ本体の内部に格納された内蔵カード(ボード)であってもよいし、内部インタフェース部140を介して接続された外部設置型機器であってもよい。

【0027】

なお、画像入力装置110が画像情報をアナログデータとして出力する場合、対応する入力インタフェース部120は、サンプリング部およびA/D変換部(共に図示せず)を有する。サンプリング部は、所定のサンプリング周波数で、入力されたアナログ信号をサンプリング処理し、A/D変換部に出力する。サンプリング周波数は、復元処理対象(情報源)の種類に応じて変更可能である。A/D変換部は、サンプリングされた信号の振幅値を所定の分解能でA/D変換処理する。

【0028】

操作部 130 は、典型的にはキーボードやマウス、タッチパネルなどであるが、音声認識装置などを用いてもよい。使用者は、操作部 130 を用い、例えば、後述するディスプレイ 182 で確認をしながらコンピュータを操作することができる。また、操作部 130 は、パラメータ設定部 132、領域指定部 134、および復元モード指定部 136 を有する。パラメータ設定部 132 は、使用者の入力操作により、後で詳述する本実施の形態における画像復元処理に必要な各種パラメータの値を設定する。領域指定部 134 は、使用者の入力操作により、入力された画像に対して画像復元処理の対象となる領域（画像の特定の範囲）を指定する。復元モード指定部 136 は、使用者の入力操作により、後述する復元モードを指定する。

【0029】

10

内部インタフェース部 140 は、コンピュータ本体の内部にあって、入力インタフェース部 120、操作部 130、記憶部 150、画像復元処理部 160、および出力インタフェース部 170 を相互に接続する機能を有する。コンピュータの内部における各種信号のやり取りは、内部インタフェース部 140 を介して行われる。

【0030】

記憶部 150 は、主記憶装置 152 および補助記憶装置 154 を有する。主記憶装置 152 は、コンピュータの本体を構成する一要素であって、主にプログラムとデータを格納する。補助記憶装置 154 は、主記憶装置 152 の容量の不足を補う記憶装置である。補助記憶装置 154 は、典型的にはハードディスク（HDD）であるが、CD-ROM や DVD、SSD（Solid State Drive）、フラッシュメモリなどの可搬性のあるものであってもよいし、また、それらの組み合わせであってもよい。本実施の形態における画像復元処理を実行させるプログラム（画像復元アルゴリズム）は、予め記憶部 150（主記憶装置 152 または補助記憶装置 154）に格納されていてもよいし、記録メディア 116 から両インタフェース部 120、140 を介して記憶部 150 にインストールしたり、モデム 118 および両インタフェース部 120、140 を介して外部から記憶部 150 にダウンロードしたりしてもよい。

20

【0031】

なお、画像入力装置 110 から画像データを取り込み、取り込んだ画像データに対して画像復元処理を行い、復元処理後の画像データを画像出力装置 180 から取り出すという一連の処理を実行するためには、取り込んだ画像データを格納しておく記憶領域と、データ処理の上で一時的に必要な記憶領域（作業領域または作業用メモリと呼ばれる）と、出力すべき画像データを格納しておく記憶領域とが必要である。これらの記憶領域は、主記憶装置 152 または補助記憶装置 154 の上に取られるが、ここでは、説明の便宜上、復元処理後の画像データを後述するディスプレイ 182 に出力する場合を想定して、特に表示メモリ 156 を図面上に別途表記している。

30

【0032】

画像復元処理部 160 は、本発明の特徴的な構成要素であり、後述する内蔵された画像復元アルゴリズムを実行する。例えば、カルマンフィルタを用いた従来の画像復元手法では、2段階処理、つまり、AR 次数を決定し、AR 係数を推定した後、この推定した AR 係数を用いて状態空間モデル（状態方程式と観測方程式）を構成してカルマンフィルタを実行することによって、画像復元を実現しているのに対し、本発明の画像復元方法（以下「発明手法」という）では、状態方程式と観測方程式から構成される新しい予測法によって画像復元を実現している。具体的には、発明手法では、AR システムのコンセプトを必要としない新しい状態空間モデル（状態方程式と観測方程式）を構成することによって、より具体的には、状態方程式をクリアな画像情報（原画像情報）のみで構成し、かつ、観測方程式を劣化画像情報、クリアな画像情報（原画像情報）、ぼけ情報、および雑音で構成した新たな状態空間モデルを用いることによって、画像復元を実現している。画像復元の対象となる画像は、静止画像でも動画画像でもよい。なお、本発明の画像復元方法については、後で詳細に説明する。

40

【0033】

50

画像出力装置 180 は、コンピュータ（画像復元処理部 160）で復元処理された画像データ（復元画像）を所定の出力形態で外部に取り出すための出力装置である。画像出力装置 180 としては、例えば、ディスプレイ 182 やプリンタ 184、記録メディア 186、モデム 188 などを用いることができる。記録メディア 186 およびモデム 188 は、画像入力装置 110 としての記録メディア 116 およびモデム 118 とそれぞれ共用してもよい。なお、画像出力装置 180 の種類は、画像復元装置 100 の用途に応じて適宜選択すればよい。

【0034】

出力インタフェース部 170 は、コンピュータ（画像復元処理部 160）で復元処理された画像データ（復元画像）を画像出力装置 180 に出力可能なデータ形式に変換するなどの出力処理を行う。図示しないが、出力インタフェース部 170 は、画像出力装置 180 の種類に応じて別個独立に設けられる。上記のように、記録メディアおよびモデムに関しては、通常、入力インタフェース部 120 と出力インタフェース部 170 は一体化されている。出力インタフェース部 170 も、入力インタフェース部 120 と同様に、コンピュータ本体の内部に格納された内蔵カード（ボード）であってもよいし、内部インタフェース部 140 を介して接続された外部設置型機器であってもよい。

【0035】

図 2（A）は、図 1 の画像復元処理部 160 の構成を示すブロック図であり、図 2（B）は、図 2（A）の第 1 復元処理部 160 a の構成を示すブロック図である。

【0036】

本実施の形態では、図 2（A）に示すように、画像復元処理部 160 は、第 1 復元処理部 160 a と第 2 復元処理部 160 b を有する。第 1 復元処理部 160 a は、本発明の画像復元方法を実施する。第 2 復元処理部 160 b は、本発明の画像復元方法以外の画像復元方法、例えば、ウィナーフィルタを用いた画像復元手法やカルマンフィルタを用いた画像復元手法などの従来の画像復元方法を実施する。これによって、第 1 復元処理部 160 a と第 2 復元処理部 160 b とを用いた画像復元処理が可能となる。なお、以下では、第 2 復元処理部 160 b で実施する従来の画像復元方法として、例えば、ウィナーフィルタを用いた画像復元手法（以下「従来手法 1」という）を例にとって説明する。

【0037】

第 1 復元処理部 160 a は、図 2（B）に示すように、初期設定部 162、相関演算部 164、重み係数算出部 166、および最適推定値算出部 168 を有する。第 1 復元処理部 160 a は、各部 162 ~ 168 の協働の下、内蔵された画像復元アルゴリズム（発明手法）を実行することによって、取り込んだ画像データ（劣化画像）のみからクリアな画像（原画像）を復元する。このとき、初期設定部 162 は、発明手法の画像復元アルゴリズムの初期設定を行い、相関演算部 164 は、原画像（所望情報、クリアな画像）の推定誤差の相関演算を行い、重み係数算出部 166 は、原画像（所望情報）の最適推定値の算出に必要な重み係数の算出を行い、最適推定値算出部 168 は、原画像（所望情報）の最適推定値の算出を行う。なお、各部 162 ~ 168 の具体的な処理内容は、後で詳細に説明する。

【0038】

以下、第 1 復元処理部 160 a で行われる画像復元処理動作について詳細に説明するが、ここでは、まず、画像復元の理論となる劣化画像モデルについて説明しておく。

【0039】

劣化した画像は、一般的に、原画像とぼけの点拡がり関数（PSF：Point Spread Function、以下単に「ぼけ関数」ともいう）の畳み込み（コンボリューション）に雑音を加えたモデルによって得られる。すなわち、イメージングシステム（対象物を撮像する装置や画像を生成するシステムなど）によって得られる劣化画像 $g(x, y)$ は、対象物を表す原画像を $f(n, m)$ 、ぼけの点拡がり関数を $h(x, y)$ 、雑音を $n(x, y)$ でそれぞれ表すと、次の式（1）で表される。なお、ぼけの点拡がり関数 $h(x, y)$ は、撮影条件なども含めたイメージングシステムの特性を表している。

【 0 0 4 0 】

【 数 1 】

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x - n, y - m) f(n, m) dn dm + n(x, y) \cdots (1)$$

【 0 0 4 1 】

図 3 は、画像の劣化の過程を説明するための図である。

【 0 0 4 2 】

10

例えば、図 3 の左端に示す原画像にぼけが生じると、図 3 の中央に示す画像となり、この画像にさらに雑音を加わると、図 3 の右端に示す劣化画像となる。ぼけは、ある画素がその周囲の画素に影響することによって生じるが、雑音は、画素に関係なく発生する。上記のように、カメラなどで撮影された画像の場合、ぼけは、手ぶれや焦点ずれなどに起因して生じ、雑音は、暗電流や熱雑音などに起因して不可避免的に発生する。図 3 に示すように、劣化画像の復元は、劣化画像からぼけと雑音を取り除くことにほかならない。

【 0 0 4 3 】

発明手法では、上記のように、AR システムのコンセプトを用いないようにするために、新しい状態空間モデル（状態方程式と観測方程式）を構成する。すなわち、クリアな画像情報（原画像情報）のみを用いて状態方程式を構成し、かつ、劣化画像情報、クリアな画像情報（原画像情報）、ぼけ情報、および雑音を用いて観測方程式を構成する。なお、本実施の形態では、発明手法として、6 つの具体的な手法を提示する。ここでは、便宜上、第 1 の発明手法から第 6 の発明手法を、発明手法 1、発明手法 2、発明手法 3、発明手法 4、発明手法 5、発明手法 6 とそれぞれ称し、順次説明する。

20

【 0 0 4 4 】

発明手法 1 ～ 6 は、いずれも、AR 係数を用いない画像復元手法であって、ぼけと雑音を同時に除去することができる、シンプルで実用的な高性能の画像復元手法である。ただし、発明手法 1 ～ 6 は、互いに、アルゴリズムの違いに応じて、演算量や復元処理速度、画像復元能力などが異なる。ここでは、各発明手法 1 ～ 6 を詳細に説明する前に、各発明手法 1 ～ 6 の特徴、長所、短所をまとめておく。

30

【 0 0 4 5 】

発明手法 1 ～ 3 は、1 次元の画像復元手法であり、発明手法 4 ～ 6 は、発明手法 1 ～ 3 をそれぞれ 2 次元に拡張した 2 次元の画像復元手法である。発明手法 1 は、本発明に係る画像復元方法の基本型である。発明手法 1 は、AR 係数を用いない画像復元手法であって、有色性駆動源を持つ状態空間モデルを構成している。発明手法 1 は、従来技術に対して、高性能な劣化画像復元が可能であるという長所を有する反面、他の発明手法 2、3 に比べて、演算量が多いという短所を有する。発明手法 2 は、発明手法 1 に対して、注目画素領域のみ考慮した状態空間モデルを再構成した手法であって、注目画素領域のみ用いることで、演算量を大幅に軽減している。発明手法 2 は、高速（低演算量）な劣化画像復元が可能であるという長所を有する（画像復元能力は発明手法 1 とほぼ同等である）。発明手法 3 は、発明手法 1、2 に対して、有色駆動源の影響も考慮した状態空間モデルを再構成した手法である。発明手法 3 は、演算量の軽減、復元処理速度の向上、有色性駆動源にも適用可能、および画像復元能力の向上といった長所を有し、画像復元能力を向上しながら高速（低演算量）な劣化画像復元が可能な手法である。

40

【 0 0 4 6 】

上記のように、発明手法 1 は、AR 係数を用いない 1 次元の画像復元手法であって、従来技術に対して、高性能な劣化画像復元が可能であるという特徴を有する。発明手法 4 ～ 6 は、2 次元の画像復元手法であって、発明手法 1 に対して、柔軟な処理効率の向上が図られるという特徴を有する。発明手法 4 は、発明手法 1 を 2 次元に拡張した画像復元手法であって、注目画素領域と周辺画素領域をそれぞれ任意にとることにより処理効率の向上

50

が図られるという長所を有する反面、他の発明手法 1 ~ 3、5、6 に比べて、演算量が多いという短所を有する。発明手法 5 は、発明手法 4 に対して、注目画素領域のみ考慮した状態空間モデルを再構成した手法であって、注目画素領域のみ用いることで、発明手法 4 に対して、演算量を大幅に軽減している。発明手法 5 は、高速（低演算量）な劣化画像復元が可能であるという長所を有する反面、発明手法 4 よりも若干復元精度が低下するという短所を有する。発明手法 6 は、発明手法 4、5 に対して、有色駆動源の影響も考慮した状態空間モデルを再構成した手法であって、発明手法 5 の短所を改善したものである。発明手法 6 は、良好な画像復元能力、有色性駆動源にも適用可能、演算量の軽減、復元する画素に適した復元処理が可能といった長所を有し、処理効率性を考慮した実用的な劣化画像復元手法である。特に、発明手法 1 ~ 3 を 2 次元に拡張した発明手法 4 ~ 6 は、注目画素領域と周辺画素領域をそれぞれ任意に選択することができるため、劣化画像の状態と使用者の要望（処理速度または処理品質）に応じて、1 次元の発明手法 1 ~ 3 に適応することも可能であるし、あるいは、若干の変更により 2 次元の発明手法 4 ~ 6 に適応することも可能である、という特徴を有する。

【0047】

具体的には、発明手法では、新しい状態空間モデル（状態方程式と観測方程式）を構成し、この新しい状態空間モデルは、次の式（2）で表される。ただし、状態方程式において、ベクトル $\mathbf{x}_{p1}(n)$ は状態ベクトル（原画像情報）、行列 Φ_{p1} は状態遷移行列、ベクトル $\delta_{p1}(n)$ は駆動源ベクトルである。また、観測方程式において、ベクトル $\mathbf{y}_{p1}(n)$ は観測ベクトル（観測画像情報、劣化画像情報）、行列 $\mathbf{M}_{p1}$ は観測遷移行列、ベクトル $\varepsilon_{p1}(n)$ は観測雑音ベクトルである。また、「 n 」とは、装置の時刻 n である。時刻 n は、注目画素（または注目画素領域）と複数の周辺画素（または周辺画素領域）とからなる処理対象ブロックの処理の順番（ n 番目）を表している。なお、ここでは、説明の便宜上、発明手法として、例えば、基本型である発明手法 1 を提示する。以下の説明において、添え字「 $p1$ 」は、発明手法 1 に係るものであることを示している。また、ここでは、注目画素領域および周辺画素領域における「画素領域」は、1 つの画素のみを含む場合と、複数の画素を含む場合の両方を意味する。すなわち、ぼけと雑音が含まれる劣化画像を復元する際の復元処理対象として、1 つの画素を「注目画素」と称し、少なくとも 1 つ以上の画素を含む領域を「注目画素領域」と称する。また、注目画素に隣接する画素を「周辺画素」と称し、注目画素に隣接する画素を含む領域、または、注目画素に隣接する画素および注目画素に隣接しないがその周辺の画素を含む領域を、「周辺画素領域」と称する。

【0048】

【数 2】

$$[\text{状態方程式}]: \mathbf{x}_{p1}(n+1) = \mathbf{F}_{p1} \mathbf{x}_{p1}(n) + \mathbf{d}_{p1}(n+1) \quad \dots (2)$$

$$[\text{観測方程式}]: \mathbf{y}_{p1}(n) = \mathbf{M}_{p1} \mathbf{x}_{p1}(n) + \mathbf{e}_{p1}(n)$$

【0049】

図 4 は、この状態空間モデルにおけるシステム構成をブロック線図で表したものである。

【0050】

図 4 に示すように、この状態空間モデルは、状態過程と観測過程とで構成される。状態過程は、状態方程式によって記述され、観測過程は、観測方程式によって記述される。図 4 において、「201」は時刻 n における状態ベクトル $\mathbf{x}_{p1}(n)$ 、「202」は時刻 $n+1$ における状態ベクトル $\mathbf{x}_{p1}(n+1)$ 、「203」は時刻 n における観測ベクトル $\mathbf{y}_{p1}(n)$ 、「204」は時刻 n における観測雑音ベクトル $\varepsilon_{p1}(n)$ 、「205」は時刻 $n+1$ における駆動源ベクトル $\delta_{p1}(n+1)$ 、「206」は状態遷移行列 Φ_{p1}

p_1 、「207」は観測遷移行列 M_{p_1} である。式(2)における状態方程式は、観測対象のシステムを状態空間モデルで記述したものであり、内部状態つまり状態変数(ここでは、状態ベクトル $x_{p_1}(n)$ 、 $x_{p_1}(n+1)$)の時間に対する生成過程を表している。また、式(2)における観測方程式は、何らかの観測装置を通じて観測する過程を記述したものであり、観測結果(ここでは、観測ベクトル $y_{p_1}(n)$)が、被観測量つまり入力(ここでは、状態ベクトル $x_{p_1}(n)$)に依存して生成される様子を示している。

【0051】

図5は、発明手法1の状態方程式の定式化の具体例を説明するための図であり、特に、図5(A)は、状態空間モデルの状態過程を示す図、図5(B)は、処理対象ブロックおよびその時間変化の一例を示す図、図5(C)は、状態方程式の具体例を示す図である。

10

【0052】

発明手法1では、劣化画像の復元処理は、復元対象である注目画素のみを用いるのではなく、その周辺の画素も含めて処理を行う。すなわち、 $J \times J$ の大きさの画像のある注目画素を中心にして、その周辺 $K \times K$ (ただし、 $J > K$)の領域を処理対象ブロックとし、この処理対象ブロックの中の画素情報を用いて、画像の復元処理を行う。このように、処理対象ブロックとは、画像復元において $K \times K$ の画素を用いて処理を行う範囲を意味する。

【0053】

例えば、 $J = 256$ 、 $K = 3$ とした場合、図5に示すように、 256×256 の大きさの画像のある注目画素を中心にして、その周辺 3×3 の画素領域が処理対象ブロックとなる。図面上、処理対象ブロックは、網かけされている。画像復元処理は、この 3×3 の処理対象ブロックの中の画素情報を用いて行われる。単に説明の便宜上、図5(B)に示すように、 256×256 の大きさの画像の一部の画素に1~36の番号を付したとすると、時刻 n における状態ベクトル $x_{p_1}(n)$ に対応する処理対象ブロックは、番号が1、2、3、7、8、9、13、14、15の 3×3 の9個の画素を構成要素とし、次の時刻 $n+1$ における状態ベクトル $x_{p_1}(n+1)$ に対応する処理対象ブロックは、番号が7、8、9、13、14、15、19、20、21の 3×3 の9個の画素を構成要素としている。

20

【0054】

このとき、式(2)における状態方程式は、図5(C)にも示す次の式(3)で定義される。ここで、状態ベクトル $x_{p_1}(n)$ は、原画像情報を含む状態量として 3×3 の処理対象ブロックに含まれる9個の画素情報 $x_1(n)$ 、 $x_2(n)$ 、 $x_3(n)$ 、 $x_4(n)$ 、 $x_5(n)$ 、 $x_6(n)$ 、 $x_7(n)$ 、 $x_8(n)$ 、 $x_9(n)$ を要素とする 9×1 次のベクトルである。また、状態遷移行列 Φ_{p_1} は、式(3)で定義された 9×9 次の行列であり、駆動源ベクトル $\delta_{p_1}(n)$ は、同じく式(3)で定義された 9×1 次のベクトルである。

30

【0055】

【数 3】

$$\mathbf{x}_{p1}(n+1) = \mathbf{F}_{p1} \mathbf{x}_{p1}(n) + \mathbf{d}_{p1}(n+1)$$

$$\begin{bmatrix} x_1(n+1) \\ x_2(n+1) \\ \vdots \\ x_9(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & & & \vdots \\ 0 & \cdots & & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & & & \ddots & 0 \\ 0 & & \cdots & \cdots & & 0 & 1 \\ - & - & - & - & - & - & - & - \\ & & & & O & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(n) \\ x_2(n) \\ \vdots \\ x_9(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ x_7(n+1) \\ x_8(n+1) \\ x_9(n+1) \end{bmatrix} \cdots (3)$$

10

【0056】

図6は、式(3)で表される状態方程式の構成を説明するための図である。

【0057】

式(3)で表される状態方程式の特徴は、状態遷移行列 Φ_{p1} の一部の要素を「1」に設定し、残りの要素をすべて「0」に設定した点、および、駆動源ベクトル $\delta_{p1}(n)$ の一部の要素を有色信号である状態量 $x_i(n)$ ($i=7, 8, 9$)で表した点にある。これは、図6に示すように、現在の時刻 $n+1$ における処理対象ブロックと過去の時刻 n における処理対象ブロックとが重なる部分において、現在の状態量(原画像の画素情報) $x_1(n+1)$ 、 $x_2(n+1)$ 、 $x_3(n+1)$ 、 $x_4(n+1)$ 、 $x_5(n+1)$ 、 $x_6(n+1)$ と過去の状態量(原画像の画素情報) $x_4(n)$ 、 $x_5(n)$ 、 $x_6(n)$ 、 $x_7(n)$ 、 $x_8(n)$ 、 $x_9(n)$ とを対応させるためである。この結果、 $x_{p1}(n)$ と $x_{p1}(n+1)$ の関係を表す状態方程式は、クリアな画像からなる状態ベクトル $x_{p1}(n)$ と、0と1からなる状態遷移行列 Φ_{p1} と、有色信号であるクリアな画像からなる駆動源ベクトル $\delta_{p1}(n)$ とから構成されるため、所望の状態量(原画像の画素情報)、つまり、クリアな画像情報(原画像情報)のみで構成されることになる。

20

30

【0058】

図7は、発明手法1の観測方程式の定式化の具体例を説明するための図であり、特に、図7(A)は、状態空間モデルの観測過程を示す図、図7(B)は、観測方程式の具体例を示す図である。

【0059】

図5および図6の例に対応して、式(2)における観測方程式は、図7(B)にも示す次の式(4)で定義される。ここで、観測ベクトル $y_{p1}(n)$ は、劣化画像情報を含む観測量として 3×3 の処理対象ブロックに含まれる9個の画素情報 $y_1(n)$ 、 $y_2(n)$ 、 $y_3(n)$ 、 $y_4(n)$ 、 $y_5(n)$ 、 $y_6(n)$ 、 $y_7(n)$ 、 $y_8(n)$ 、 $y_9(n)$ を要素とする 9×1 次のベクトルである。また、観測遷移行列 M_{p1} は、式(4)で定義された 9×9 次の行列であって、画像の劣化モデルにおけるぼけの点拡がり関数(PSF)に対応している。観測遷移行列 M_{p1} を構成する各要素 $h_{r,s}$ (r, s は h の座標であり、 $r, s = -1, 0, 1$)は、既知であって、予めデータ化して適切に設定されている。また、観測雑音ベクトル $\varepsilon_{p1}(n)$ は、 3×3 の処理対象ブロックに含まれる9個の画素に対応する観測雑音 $\varepsilon_1(n)$ 、 $\varepsilon_2(n)$ 、 $\varepsilon_3(n)$ 、 $\varepsilon_4(n)$ 、 $\varepsilon_5(n)$ 、 $\varepsilon_6(n)$ 、 $\varepsilon_7(n)$ 、 $\varepsilon_8(n)$ 、 $\varepsilon_9(n)$ を要素とする 9×1 次のベクトルである。

40

【0060】

【数 4】

$$\mathbf{y}_{p1}(n) = \mathbf{M}_{p1} \mathbf{x}_{p1}(n) + \mathbf{e}_{p1}(n)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(n) \\ y_2(n) \\ \vdots \\ y_9(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{0,0} & h_{0,-1} & h_{1,1} & h_{1,0} & h_{1,-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_{0,1} & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ h_{-1,-1} & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & 0 \\ h_{-1,0} & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ h_{-1,1} & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & h_{1,-1} \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & h_{1,0} \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & h_{1,1} \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & h_{0,-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_{-1,1} & h_{-1,0} & h_{-1,-1} & h_{0,1} & h_{0,0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(n) \\ x_2(n) \\ \vdots \\ x_9(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1(n) \\ \varepsilon_2(n) \\ \vdots \\ \varepsilon_9(n) \end{bmatrix}$$

10

... (4)

【0061】

20

図8は、従来一般的な観測方程式の構成（一般例）を説明するための図であり、図9は、式（4）で表される発明手法1の観測方程式の構成を説明するための図である。特に、図8（A）は、従来一般的な観測方程式の定義を示す図、図8（B）は、観測量に影響する状態量の範囲を視覚的に示す図である。また、図9（A）は、発明手法1の観測方程式の定義を示す図、図9（B）は、観測量に影響する状態量の範囲を視覚的に示す図である。なお、図8および図9の説明においては、便宜上、観測雑音ベクトル $\varepsilon_{p1}(n)$ は省略する。

【0062】

画像においてぼけに基づく劣化とは、上記のように、ある画素がその周囲の画素の影響を受けて劣化することである。そこで、従来は、一般的に、図8（A）に示すように観測方程式を定義していた。この場合、ぼけは、周囲のすべての画素の影響を受けることに起因して生じる。すなわち、処理対象ブロックの中の各画素は、処理対象ブロックの中のすべての画素の影響を受けることになる。言い換えれば、各観測量 y_i （ $i = 1, 2, \dots, 9$ ）は、すべての状態量 x_i （ $i = 1, 2, \dots, 9$ ）の影響を受けて成り立つ。これを視覚的に示すと、例えば、図8（B）に示すようになる。すなわち、図8（B）に示すように、例えば、観測量が y_1 の場合も y_2 の場合も、 3×3 （ $= 9$ ）個のすべての状態量 $x_1 \sim x_9$ の影響を受けることになる。

30

【0063】

これに対し、式（4）で表される発明手法1の観測方程式の特徴は、観測遷移行列 $\mathbf{M}_{p1}$ の一部の要素を、 3×3 （ $= 9$ ）個の係数 $h_{r,s}$ （座標 $r, s = -1, 0, 1$ ）を用いて規則的に設定し、残りの要素をすべて「0」に設定した点にある。例えば、図9（A）は、観測方程式を展開して得られる一部の式（ $y_1(n)$ 、 $y_2(n)$ に関する式）を示している。観測遷移行列 $\mathbf{M}_{p1}$ に対する係数 $h_{r,s}$ の割り当て方法は、次の通りである。すなわち、9個の係数 $h_{r,s}$ （ $r, s = -1, 0, 1$ ）を図10に示すようにマトリックス状に配列し（以下「係数マトリックス」という）、係数マトリックスの中央（つまり、係数 $h_{0,0}$ ）の位置を観測量 y_i （ $i = 1, 2, \dots, 9$ ）の注目画素 i の位置に合わせたときの、その係数マトリックスに従って、観測遷移行列 $\mathbf{M}_{p1}$ の一部の要素に係数 $h_{r,s}$ （ $r, s = -1, 0, 1$ ）を割り当てる。これを視覚的に示すと、例えば、図9（B）に示すようになる。すなわち、図9（B）に示すように、例えば、観測量が y_1 の場合は、 3×3 （ $= 9$ ）個の状態量 $x_1 \sim x_9$ のうち、5個の $x_1 \sim x_5$ の影響を受け

40

50

、観測量が y_2 の場合は、6 個の $x_1 \sim x_6$ の影響を受けることになる。

【0064】

図11は、図9(A)に示す観測遷移行列 M_{p1} に基づく、各観測量 y_i に影響する状態量 x_i の範囲を、割り当てられた係数 $h_{r,s}$ ($r, s = -1, 0, 1$) と共に示す図である。なお、ここでは、説明の便宜上、図11(A)～図11(I)の各図において、左側の処理対象ブロックには、注目する観測量 y_i のみを示し、右側の処理対象ブロックには、影響を与える各状態量 x_i の場所に、この状態量 x_i に乗算される $h_{r,s}$ のみを示している。

【0065】

式(4)で表される観測方程式では、観測量 y_1 は、図11(A)に示すように、5 個の状態量 $x_1 \sim x_5$ の影響を受け、観測量 y_2 は、図11(B)に示すように、6 個の状態量 $x_1 \sim x_6$ の影響を受け、観測量 y_3 は、図11(C)に示すように、7 個の状態量 $x_1 \sim x_7$ の影響を受ける。また、観測量 y_4 は、図11(D)に示すように、8 個の状態量 $x_1 \sim x_8$ の影響を受け、観測量 y_5 は、図11(E)に示すように、9 個すべての状態量 $x_1 \sim x_9$ の影響を受け、観測量 y_6 は、図11(F)に示すように、8 個の状態量 $x_2 \sim x_9$ の影響を受ける。また、観測量 y_7 は、図11(G)に示すように、7 個の状態量 $x_3 \sim x_9$ の影響を受け、観測量 y_8 は、図11(H)に示すように、6 個の状態量 $x_4 \sim x_9$ の影響を受け、観測量 y_9 は、図11(I)に示すように、5 個の状態量 $x_5 \sim x_9$ の影響を受ける。

【0066】

図12は、発明手法1のアルゴリズムの一例を示す図である。なお、このアルゴリズムは、画像の種類を問わず、静止画像のみならず動画像にも適用可能である。

【0067】

発明手法1のアルゴリズムは、図12に示すように、初期設定(Initialization)の過程と反復(Iteration)の過程とに大別され、反復過程は、新しい状態空間モデル(状態方程式と観測方程式)を基に構成されている。反復過程では、1～6の手順を逐次繰り返す。

【0068】

図13は、図12のアルゴリズムを実行する処理手順を示すフローチャートである。

【0069】

まず、初期設定部162で、初期設定を行う(S1000)。具体的には、初期設定部162において、状態ベクトル、つまり、状態量である所望信号(原画像信号)ベクトルの最適推定値(以下「所望信号の最適推定値ベクトル」という)の初期値 $x_{p1}(0|0)$ 、所望信号ベクトルの推定誤差(以下「所望信号の推定誤差ベクトル」という)の相関行列の初期値 $P_{p1}(0|0)$ 、駆動源ベクトルの共分散の値 $R_{\delta p1}(n)[i,j]$ 、および、観測雑音ベクトルの共分散の値 $R_{\varepsilon p1}(n)[i,j]$ を、次の式(5)に示すようにそれぞれ設定する。また、図12では図示しないが、状態遷移行列 Φ_{p1} および観測遷移行列 M_{p1} を、式(3)および式(4)に示すようにそれぞれ設定する。なお、ここでは、時刻 n のカウンタの初期値を「0」に設定している。また、ベクトルと行列の要素を示す場合、ベクトル $a(n)$ の i 番目の要素を $a(n)[i]$ と表記し、行列 $A(n)$ の i 行 j 列の要素を $A(n)[i,j]$ と表記することとする。また、図12において、所望信号の最適推定値ベクトル x_{p1} は、ハット $\hat{x}_{p1}$ と表記する。

【0070】

【数 5】

$$\hat{\mathbf{x}}_{p1}(0|0) = \mathbf{0}_K$$

$$\mathbf{P}_{p1}(0|0) = \mathbf{I}_K$$

$$\mathbf{R}_{\delta_{p1}}(n)[i, j] = \begin{cases} \frac{1}{K} \sum_{l=1}^K [\hat{\mathbf{x}}_{p1}^T(n-l)[1] \hat{\mathbf{x}}_{p1}(n-l)[1]] & (i = j, \quad i, j > K^2 - K) \\ 0 & (i = j, \quad i, j \leq K^2 - K) \\ 0 & (other) \end{cases}$$

10

$$\mathbf{R}_{\varepsilon_{p1}}[i, j] = E[\mathbf{e}_{p1}(n)\mathbf{e}_{p1}^T(n)][i, j] = \begin{cases} \sigma_{\varepsilon}^2 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

... (5)

【0071】

ただし、ベクトル $\mathbf{0}_K$ は、 K 次元の零ベクトルであり、行列 $\mathbf{I}_K$ は、 K 次の単位行列である。また、 K は、 $K \times K$ の大きさの処理対象ブロック（注目画素領域と周辺画素領域）のその次元である。 $K = 3$ の場合、 $K^2 - K = 6$ となり、「 $i, j > K^2 - K$ 」は、「 $i, j = 7, 8, 9$ 」に対応している。また、 $E[\delta_{p1}(n), \delta_{p1}^T(n)]$ は、駆動源ベクトル $\delta_{p1}(n)$ の自己相関行列である。 $E[\varepsilon_{p1}(n)\varepsilon_{p1}^T(n)][i, j]$ は、観測雑音ベクトル ε_{p1} の自己相関行列であり、ここでは $\sigma_{\varepsilon}^2[i, j]$ と等しく、既知と仮定している。ここでいう「既知」とは、別の任意の方法（アルゴリズム）で求められて与えられることを意味する。もし観測雑音ベクトル $\varepsilon_{p1}(n)$ が白色雑音であり零平均であれば、 σ_{ε}^2 は所定のサンプル数の分散で与えられる。

20

【0072】

次に、相関演算部 164 で、 $n \rightarrow (n+1)$ の誤差共分散行列、つまり、 $n \rightarrow (n+1)$ の推定誤差の相関値（行列）（以下「相関行列」ともいう）を計算する（S1100）。具体的には、相関演算部 164 において、時刻 n までの情報により時刻 $n+1$ での所望信号ベクトルを推定した場合の誤差（所望信号の推定誤差ベクトル）の相関行列 $\mathbf{P}_{p1}(n+1|n)$ を計算する。この計算は、ステップ S1000 でそれぞれ設定した状態遷移行列 Φ_{p1} および駆動源ベクトルの共分散 $\mathbf{R}_{\delta_{p1}}(n+1)[i, j]$ の値、ならびに、ステップ S1000 で設定した（ $n=0$ の場合）または前回のステップ S1600 で計算した（ $n=1$ の場合）所望信号の推定誤差ベクトルの相関行列 $\mathbf{P}_{p1}(n|n)$ を用いて、次の式（6）により行う。なお、このステップ S1100 は、図 12 の反復過程の手順 1 に相当する。

30

【0073】

【数 6】

$$\mathbf{P}_{p1}(n+1|n) = \mathbf{F}_{p1} \mathbf{P}_{p1}(n|n) \mathbf{F}_{p1}^T + \mathbf{R}_{\delta_{p1}}(n+1) \quad \dots (6)$$

40

【0074】

次に、重み係数算出部 166 で、重み係数（行列）の計算を行う（S1200）。具体的には、重み係数算出部 166 において、観測量である観測信号ベクトルの推定誤差（以下「観測信号の推定誤差ベクトル」という）に重み係数（行列）をかけて、時刻 n までの情報による時刻 $n+1$ での所望信号の最適推定値ベクトル $\mathbf{x}_{p1}(n+1|n)$ を加えたものが、時刻 $n+1$ までの情報による時刻 $n+1$ での所望信号の最適推定値ベクトル $\mathbf{x}_{p1}(n+1|n+1)$ になるような、その重み係数行列 $\mathbf{K}_{p1}(n+1)$ を計算する。この計算は、ステップ S1100 で計算した所望信号の推定誤差ベクトルの相関行列 $\mathbf{P}_{p1}(n+1|n)$ 、ならびに、ステップ S1000 でそれぞれ設定した観測遷移行列 $\mathbf{M}_{p1}$

50

および観測雑音ベクトルの共分散 $R_{\varepsilon_{p1}}(n+1)[i, j]$ の値を用いて、次の式 (7) により行う。なお、このステップ S 1 2 0 0 は、図 1 2 の反復過程の手順 2 に相当する。

【 0 0 7 5 】

【数 7】

$$K_{p1}(n+1) = \{P_{p1}(n+1|n)M_{p1}^T\} \{M_{p1}P_{p1}(n+1|n)M_{p1}^T + R_{\varepsilon_{p1}}(n+1)\}^{-1} \cdots (7)$$

【 0 0 7 6 】

10

次に、最適推定値算出部 1 6 8 で、 $n \rightarrow (n+1)$ の状態量 (所望信号) の最適推定値 (ベクトル) を計算する (S 1 3 0 0) 。具体的には、最適推定値算出部 1 6 8 において、時刻 n までの情報による時刻 $n+1$ での所望信号の最適推定値ベクトル $x_{p1}(n+1|n)$ を計算する。この計算は、ステップ S 1 0 0 0 で設定した状態遷移行列 Φ_{p1} 、および、前回のステップ S 1 4 0 0 で計算した所望信号の最適推定値ベクトル $x_{p1}(n|n)$ を用いて、次の式 (8) により行う。なお、このステップ S 1 3 0 0 は、図 1 2 の反復過程の手順 3 に相当する。

【 0 0 7 7 】

【数 8】

$$\hat{x}_{p1}(n+1|n) = F_{p1}\hat{x}_{p1}(n|n) \cdots (8)$$

20

【 0 0 7 8 】

次に、同じく最適推定値算出部 1 6 8 で、 $(n+1) \rightarrow (n+1)$ の状態量 (所望信号) の最適推定値 (ベクトル) を計算する (S 1 4 0 0) 。具体的には、最適推定値算出部 1 6 8 において、時刻 $n+1$ までの情報による時刻 $n+1$ での所望信号の最適推定値ベクトル $x_{p1}(n+1|n+1)$ を計算する。この計算は、ステップ S 1 3 0 0 で計算した所望信号の最適推定値ベクトル $x_{p1}(n+1|n)$ 、ステップ S 1 2 0 0 で計算した重み係数行列 $K_{p1}(n+1)$ 、ステップ S 1 0 0 0 で設定した観測遷移行列 M_{p1} 、および時刻 $n+1$ における観測信号ベクトル $y_{p1}(n+1)$ を用いて、次の式 (9) により

30

【 0 0 7 9 】

【数 9】

$$\hat{x}_{p1}(n+1|n+1) = \hat{x}_{p1}(n+1|n) + K_{p1}(n+1)\{y_{p1}(n+1) - M_{p1}\hat{x}_{p1}(n+1|n)\} \cdots (9)$$

【 0 0 8 0 】

40

次に、処理を終了するか否かを判断する (S 1 5 0 0) 。この判断は、例えば、時刻 n が所定のサンプル数 N に達したか否かを判定することによって行う。この判断の結果として、時刻 n が所定のサンプル数 N に達していない場合は (S 1 5 0 0 : NO) 、ステップ S 1 6 0 0 に進み、時刻 n が所定のサンプル数 N に達した場合は (S 1 5 0 0 : YES) 、ステップ S 1 8 0 0 に進む。なお、判断の基準は、上記の例に限定されない。例えば、リアルタイムで処理を行う場合は、時刻 n が所定のサンプル数 N に達していなくても、サンプルがなくなった時点で処理を終了するようにしてもよい。

【 0 0 8 1 】

ステップ S 1 6 0 0 では、相関演算部 1 6 4 で、 $(n+1) \rightarrow (n+1)$ の誤差共分散行列、つまり、 $(n+1) \rightarrow (n+1)$ の推定誤差の相関値 (行列) を計算する。具体的

50

には、相関演算部 164 において、時刻 $n+1$ までの情報により時刻 $n+1$ での所望信号ベクトルを推定した場合の誤差（所望信号の推定誤差ベクトル）の相関行列 $P_{p1}(n+1|n+1)$ を計算する。この計算は、ステップ S1200 で計算した重み係数行列 $K_{p1}(n+1)$ 、ステップ S1000 で設定した観測遷移行列 M_{p1} 、およびステップ S1100 で計算した所望信号の推定誤差ベクトルの相関行列 $P_{p1}(n+1|n)$ を用いて、次の式（10）により行う。なお、このステップ S1600 は、図 12 の反復過程の手順 5 に相当する。

【0082】

【数 10】

$$P_{p1}(n+1|n+1) = \{I - K_{p1}(n+1)M_{p1}\}P_{p1}(n+1|n) \quad \cdots (10)$$

【0083】

次に、ステップ S1700 では、時刻 n のカウンタを 1 だけインクリメントして（ $n = n+1$ ）、ステップ S1100 に戻る。

【0084】

一方、ステップ S1800 では、本アルゴリズムの計算結果を出力値として一時保存する。具体的には、ステップ S1400 で計算した所望信号の最適推定値ベクトル $x_{p1}(n+1|n+1)$ を、本アルゴリズムの出力値として画像復元処理部 160 内または記憶部 150 内に一時保存する。

【0085】

図 14 は、発明手法 1 を視覚的にまとめた説明図である。このように、発明手法 1 では、新しい状態空間モデル（状態方程式と観測方程式）を構成しているため、1 段階処理で画像の復元処理が可能となる。このことは、他の発明手法 2～6 も含めて本発明の大きな特徴の 1 つである。

【0086】

ここで、カルマンフィルタを用いた従来の画像復元手法との対比において、発明手法 1 の特徴と効果をまとめて説明しておく。

【0087】

カルマンフィルタを用いた従来の画像復元手法では、上記のように、2 段階処理（ステップ 1 で、AR 次数を決定し、AR 係数を推定した後、ステップ 2 で、この推定した AR 係数を用いて状態空間モデル（状態方程式と観測方程式）を構成してカルマンフィルタを実行する）によって、画像の復元を実現している。したがって、ステップ 1 での AR 次数の決定および AR 係数の推定の精度によってステップ 2 でのカルマンフィルタによる画像復元能力が大きく左右されることが、容易に予想される。これに対して、発明手法 1 では、AR システムのコンセプトを必要としない新しい状態空間モデル（状態方程式と観測方程式）を構成し、これを用いた 1 段階処理の新しい予測法によって、高性能な画像復元を実現している。また、発明手法 1 では、処理ステップを 1 段階減らすことができるため、演算量を削減することができ、ひいては、回路規模の縮小やメモリ容量の削減などを行うことができる。

【0088】

また、カルマンフィルタを用いた従来の画像復元手法では、ステップ 1 で AR 係数の推定を行う際に必要となる AR 係数の次数の決定が大きな問題点となる。一般に AR 係数の次数は状態量に依存しているため、状態量が既知でなければ、理論的に AR 係数の次数を正確に決定することは困難である。このことは、状態量が既知でなければならないことを意味しているため、リアルタイム処理は困難となる。また、それにより、正確でない AR 係数の次数を用いることになるため、正確な AR 係数の推定は困難である。したがって、このことは、カルマンフィルタを用いた従来の画像復元手法の画像復元能力を劣化させる大きな要因となっている。また、何らかの技術で AR 次数と AR 係数をリアルタイムに推定できるようになったとしても、処理ステップが 1 段階増えることより演算量の増加は避

10

20

30

40

50

けられない。これに対して、発明手法 1 では、A R システムのコンセプトを必要としないため、このような問題は生じない。

【 0 0 8 9 】

また、カルマンフィルタを用いた従来の画像復元手法では、状態量を A R システムを用いて表現することによってモデル化している。このことは、カルマンフィルタを用いた従来の画像復元手法は A R システムでモデル化可能な状態量にしか適用できないことを意味している。すなわち、カルマンフィルタを用いた従来の画像復元手法は、A R システムでモデル化が困難な状態量には適用することができない。これに対して、発明手法 1 は、A R システムのコンセプトを必要としないため、適用対象に関するこのような制約は存在しない。

10

【 0 0 9 0 】

また、カルマンフィルタを用いた従来の画像復元手法では、状態方程式の駆動源が白色信号で、かつ、状態量と観測雑音が無相関であることを仮定した上で、カルマンフィルタ理論を適用している。これに対して、発明手法 1 では、駆動源が有色信号（クリアな画像）となるものの、状態方程式と観測方程式の特殊な構成によって発明手法 1 のアルゴリズムを実行することができる。このことは、発明手法 1 は、カルマンフィルタ理論の一般的な適用条件を考慮しなくても実行可能であることを意味している。すなわち、発明手法 1 は、カルマンフィルタ理論よりも適用範囲が広いといえる。

【 0 0 9 1 】

したがって、A R システムのコンセプトを必要としない発明手法 1 は、画像の撮り直しが許されない場面、例えば、医療分野における瞬間的な心臓や肺などの画像復元、汚れなどで劣化した古文書などの復元、および文字・物体認識においても貢献可能な技術である。

20

【 0 0 9 2 】

また、本発明者は、本発明の効果（発明手法 1 の有効性）を実証するためにシミュレーションを行った。具体的には、発明手法 1 の画像復元能力を評価するために、（ 1 ）視覚評価、（ 2 ）客観評価、および（ 3 ）主観評価を行った。視覚評価は、原画像と復元画像とを視覚により比較した評価である。客観評価は、数値による評価である。主観評価は、聞き取り調査である。以下、これらを順に説明する。

【 0 0 9 3 】

まず、シミュレーションの条件について説明しておく。

【 0 0 9 4 】

図 1 5 は、シミュレーション条件を説明するための図である。

【 0 0 9 5 】

本シミュレーションでは、原画像として、図 1 5 に示す 2 つの画像、つまり、（ a ）「カメラマン（Cameraman）」と（ b ）「レナ（Lenna）」を用いた。また、原画像に加えるぼけに対応する点拡がり関数（ P S F ）のモデルとして、図 1 5 に示す 2 次元ガウス関数を用い、雑音として、加法性白色ガウス雑音を用いた。また、信号対雑音比 S N R を 2 0 d B とした。また、比較のため、シミュレーションは、同一の上記シミュレーション条件の下で、従来手法 1（ウィナーフィルタを用いた画像復元手法）と、従来手法 2（射影フィルタを用いた画像復元手法）と、従来手法 3（カルマンフィルタを用いた画像復元手法）と、発明手法 1 に対して行った。例えば、画像「カメラマン」は、図 1 6 に示すように、空の部分は画像の分散が変化していないため定常性が強く、人物の頭の部分は画像の分散が変化しているため非定常性が強いといえる。

40

【 0 0 9 6 】

（ 1 ）視覚評価

図 1 7 は、原画像「カメラマン」に対するシミュレーション結果（視覚評価）を示す図であり、図 1 8 は、図 1 7 中の破線の円の周辺領域を拡大した図である。

【 0 0 9 7 】

図 1 8 によく示すように、従来手法 1 は、ぼけがほとんど取り除かれていない。また、

50

従来手法 2 は、従来手法 1 よりもぼけが取り除かれているが、原画像と比べるとまだぼけが残っている。一方、従来手法 3 は、従来手法 1、2 に比べて、ぼけは取り除かれてくっきりしているように見えるが、原画像とは異なった復元画像となっている。特に、従来手法 3 は、原画像と比べて全体的に暗くなっており、空の部分においては、劣化画像よりも劣化してしまっている。

【0098】

これに対して、発明手法 1 は、図 18 によく示すように、従来手法 1、2、3 に比べて原画像を忠実に復元していることが確認できる。すなわち、図 18 の拡大画像においても、発明手法の有効性を確認することができる。

【0099】

図 19 は、図 17 と同様の、原画像「カメラマン」に対するシミュレーション結果（視覚評価）を示す図であり、図 20 は、図 19 中の破線の円の周辺領域を拡大した図である。

【0100】

図 20 によく示すように、カメラの三脚部分に注目すると、従来手法 1 は、全くぼけが取り除かれていない。また、従来手法 2 は、従来手法 1 よりもぼけが取り除かれているが、原画像までは復元されていない。一方、従来手法 3 は、従来手法 1、2 に比べるとぼけは取り除かれているように見えるが、画像全体が荒れてしまっており、原画像とかけ離れた復元画像となっていることが確認できる。

【0101】

これに対して、発明手法 1 は、図 20 によく示すように、従来手法 1、2、3 に比べて原画像をより忠実に復元していることが確認できる。すなわち、図 20 の拡大画像においても、発明手法 1 の有効性を確認することができる。

【0102】

図 21 は、原画像「レナ」に対するシミュレーション結果（視覚評価）を示す図であり、図 22 は、図 21 中の破線の円の周辺領域を拡大した図である。

【0103】

図 22 によく示すように、従来手法 1 は、ほとんどぼけが取り除かれておらず、復元画像が原画像と比べて全体的に白くなっている（輝度が高くなっている）。また、従来手法 2 は、従来手法 1 に比べるとぼけは取り除かれているが、原画像まではぼけが取り除かれていない。一方、従来手法 3 は、従来手法 1、2 に比べるとぼけが取り除かれておりはっきりとしているように見えるが、劣化画像よりも劣化してしまっており、原画像とはかけ離れた画像になっている。特に肌の部分に注目すると、この点が顕著に表れている。

【0104】

これに対して、発明手法 1 は、図 22 によく示すように、従来手法 1、2、3 に比べて原画像を忠実に復元していることが確認できる。すなわち、図 22 の拡大画像においても、発明手法 1 の有効性を確認することができる。

【0105】

（2）客観評価（数値による評価）

図 23 は、原画像に対するシミュレーション結果（客観評価）を示す図である。

【0106】

ここでは、従来手法 1～3 と発明手法 1 の画像復元能力を数値により評価するため、図 23 にも示す次の式（11）で表される $PSNR [dB]$ を用いて画像復元能力を評価した。なお、 $PSNR$ （Peak Signal-to-Noise Ratio）は、画像の信号に対する雑音の比であり、数値が大きいほど劣化（ぼけや雑音など）が少なく画像として良好であるといえる。

【0107】

10

20

30

40

【数 1 1】

$$PSNR = 20 \log_{10} \frac{\sum_{x=1}^{256} \sum_{y=1}^{256} f(x, y)^2}{\sum_{x=1}^{256} \sum_{y=1}^{256} [f(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2} [dB]$$

... (11)

【0108】

10

この場合、図23に示すように、「カメラマン」、「レナ」どちらの画像についても、発明手法1は、従来手法1、2、3よりも SNR_{OUT} の数値が大きいことが確認できる。これにより、発明手法1は、客観評価の点でも、従来手法1、2、3に比べて画像復元能力が高いことがわかる。

【0109】

(3) 主観評価 (聞き取り調査)

図24は、原画像に対するシミュレーション結果 (主観評価) を示す図である。

【0110】

ここでは、従来手法1～3と発明手法1の画像復元能力を評価するために、聞き取り調査による主観評価を行った。画像復元の性能評価は、ACR (絶対範疇評価) に基づく5段階MOS (平均オピニオン値) を用いた聞き取り調査により行った。MOS評価基準は、図24に示す通りである。50人の聴取者が画像復元により得られた画像 (図17～図22参照) を評価した。各々の聴取者は、評価値「1」から「5」を決定する。評価値「5」が最良である。

20

【0111】

図24に示すように、MOS評価は、「カメラマン」、「レナ」どちらの画像についても、発明手法1は、従来手法1、2、3よりも高い評価を得ていることが確認できる。これにより、発明手法1は、主観評価の点でも、従来手法1、2、3に比べて画像復元能力が高いことがわかる。

【0112】

30

以上の実験結果により、本発明の画像復元方法 (発明手法1) は、従来手法1～3に比べて高い画像復元能力を発揮していることがわかる。特に、図17～図22の視覚評価から明らかなように、本発明の画像復元方法は、非定常性が強いエッジ部分などにおいて、従来手法1～3に比べて著しく復元精度が高いことがわかる。

【0113】

次いで、上記構成を有する画像復元装置100の動作について、図25に示すフローチャートを用いて説明する。なお、図25に示すフローチャートは、記憶部150 (主記憶装置152または補助記憶装置154) に制御プログラムとして格納されており、図示しないCPUによって実行される。

【0114】

40

まず、ステップS2000では、画像入力装置110から復元処理対象の画像データ (劣化画像) を取り込み、記憶部150 (主記憶装置152または補助記憶装置154) の所定の記憶領域に格納する。

【0115】

そして、ステップS2050では、ステップS2000で取り込んだ画像データを表示メモリ156に書き込んで、ディスプレイ182に表示する。

【0116】

そして、ステップS2100では、操作部130の領域指定部134で、領域指定処理を行う。具体的には、使用者の入力操作により、ステップS2050でディスプレイ182に表示した画像のうち画像復元処理の対象となる領域 (画像の特定の範囲) が指定され

50

ると、その指定された領域のデータを生成する。領域の指定は、例えば、画面上、ポインタなどで行われる。なお、使用者により領域の指定が行われなかった場合は、表示された画像全体を指定したものとして取り扱われる。

【0117】

そして、ステップS2150では、拡大処理を行うか否かを判断する。この判断は、例えば、ステップS2100で生成した指定領域データに基づいて行われる。具体的には、指定された領域が表示された画像全体よりも小さい場合には、拡大処理を行うと判断する。この判断の結果として、拡大処理を行う場合は(S2150: YES)、ステップS2200に進み、拡大処理を行わない場合は(S2150: NO)、直ちにステップS2250に進む。

10

【0118】

ステップS2200では、ステップS2100で指定した領域の拡大処理を行う。具体的には、例えば、指定された領域が表示された画像全体に対応する大きさとなるように拡大処理を行う。拡大処理の結果は、記憶部150(主記憶装置152または補助記憶装置154)の作業用メモリに書き込まれる。なお、拡大処理が行われなかった場合も、その画像データは作業用メモリに書き込まれる。

【0119】

そして、ステップS2250では、時刻nの処理対象ブロック(例えば、 3×3 の大きさ)を選択する。

【0120】

20

そして、ステップS2300では、ステップS2250で選択した処理対象ブロックに対して、画像の急激な変化領域が検出されたか否かを判断する。画像の急激な変化領域は、例えば、画像のエッジ部分などに相当する。具体的には、例えば、作業用メモリに書き込まれた画像データ(拡大処理の有無を問わず)に対して、ステップS2250で選択した処理対象ブロック(3×3 の大きさ)上で画素データを順次スキャンすることにより、急激な画素データの変化点があるか否かを検出する。この判断の結果として、画像の急激な変化領域が検出された場合は(S2300: YES)、ステップS2350に進み、画像の急激な変化領域が検出されなかった場合は(S2300: NO)、ステップS2400に進む。

【0121】

30

具体的な検出方法の一例は、次の通りである。ある一定量の過去の観測量の平均値 $y'(n-1)$ と現在の観測量 $y(n)$ との差の絶対値、つまり、 $|y'(n-1) - y(n)|$ の値をしきい値 α と比較する。そして、その値がしきい値 α 以上の場合、つまり、 $|y'(n-1) - y(n)| \geq \alpha$ の場合は、急激な画素データの変化点があると判断し、その値がしきい値 α 未満の場合、つまり、 $|y'(n-1) - y(n)| < \alpha$ の場合は、急激な画素データの変化点はないと判断する。例えば、図26において、時刻 $n-1$ の処理対象ブロック301における所定部分302の観測量の平均値 $y'(n-1)$ と、時刻 n の処理対象ブロック303における注目画素の部分304の観測量 $y(n)$ とを比較する。

【0122】

ステップS2350では、ステップS2250で選択した処理対象ブロックに対して、発明手法による画像復元処理を行う。発明手法による画像復元処理は、上記のように、急激な画素データの変化点がある場合、つまり、エッジ部分などを含む場合であっても、高精度な復元処理が可能である。なお、発明手法による画像復元処理の詳細な手順の一例については、図13のフローチャートを用いて説明した通りである。

40

【0123】

一方、ステップS2400では、ステップS2250で選択した処理対象ブロックに対して、発明手法以外の他の画像復元手法による画像復元処理を行う。他の画像復元手法としては、ウィナーフィルタを用いた画像復元手法や射影フィルタを用いた画像復元手法、カルマンフィルタを用いた画像復元手法などを含む任意の画像復元手法を用いることができる。急激な画素データの変化点がない場合、つまり、エッジ部分などを含まない場合に

50

は、他の画像復元手法でも精度良く復元処理を行うことができるからである。

【 0 1 2 4 】

そして、ステップ S 2 4 5 0 では、ステップ S 2 3 5 0 での復元処理結果またはステップ S 2 4 0 0 での復元処理結果を、順次、記憶部 1 5 0 (主記憶装置 1 5 2 または補助記憶装置 1 5 4) の作業用メモリに保存する。

【 0 1 2 5 】

そして、ステップ S 2 5 0 0 では、時刻 n のカウンタの値を 1 だけインクリメントする。

【 0 1 2 6 】

そして、ステップ S 2 5 5 0 では、1 頁分の画像復元処理が終了したか否かを判断する。この判断は、時刻 n のカウンタの値に基づいて行われる。この判断の結果として、1 頁分の画像復元処理が終了した場合は (S 2 5 5 0 : Y E S)、ステップ S 2 6 0 0 に進み、1 頁分の画像復元処理が終了していない場合は (S 2 5 5 0 : N O)、ステップ S 2 2 5 0 に戻る。

10

【 0 1 2 7 】

ステップ S 2 6 0 0 では、1 頁分の画像復元処理が終了したため、表示メモリ 1 5 6 の更新処理を行う。すなわち、ここでは、1 頁分の画像復元処理が終了した時点で表示メモリ 1 5 6 を更新するように構成されている。

【 0 1 2 8 】

そして、ステップ S 2 6 5 0 では、ステップ S 2 0 0 0 で取り込んだ画像データの全頁分に対して画像復元処理が終了したか否かを判断する。この判断の結果として、全頁分の画像復元処理が終了していない場合は (S 2 6 5 0 : N O)、ステップ S 2 2 5 0 に戻り、全頁分の画像復元処理が終了した場合は (S 2 6 5 0 : Y E S)、上記一連の処理を終了する。

20

【 0 1 2 9 】

次に、ぼけ情報である点拡がり関数 (P S F) に対応する観測遷移行列 $M_{p,1}$ の設定と実装の具体例について、図 2 7 および図 2 8 を用いて説明する。

【 0 1 3 0 】

図 2 7 は、復元モードの実装の一例を説明するための図である。

【 0 1 3 1 】

上記のように、観測遷移行列 $M_{p,1}$ は、式 (4) で定義された 9×9 次の行列であって、画像の劣化モデルにおけるぼけの点拡がり関数 (P S F) に対応しており、観測遷移行列 $M_{p,1}$ を構成する各要素 $h_{r,s}$ ($r, s = -1, 0, 1$) は、既知であって、予めデータ化して適切に設定されている。すなわち、本実施の形態では、画像によってぼけ具合が変わるため、いわばぼけ情報である観測遷移行列 $M_{p,1}$ の各要素 $h_{r,s}$ の値の組を復元モードとしていくつか予め設定しておき、使用者は、操作部 1 3 0 の復元モード指定部 1 3 6 を介して、その復元モードを任意に指定できるように構成されている。例えば、図 2 7 の例では、デジタルカメラなどによく設定されている夜景モードやスポーツモードなどの撮影モード毎に、予め、その撮影モードに合った適切な観測遷移行列 $M_{p,1}$ がそれぞれ設定されている。したがって、使用者は、撮影モードを切り替えることによって、最適な復元モードを使用することができる。なお、復元モード (観測遷移行列 $M_{p,1}$ の各要素 $h_{r,s}$ の値) 自体を自動または手動で再調整することも可能である。

30

40

【 0 1 3 2 】

図 2 8 は、復元モードの実装の他の例を説明するための図である。

【 0 1 3 3 】

図 2 8 の例では、画像によってぼけ具合が変わるため、まず、図 2 8 (A) に示すように、ディスプレイ 1 8 2 上で、処理対象の劣化画像を選択した後、図 2 8 (B) に示すように、観測遷移行列 $M_{p,1}$ (各要素 $h_{r,s}$ の値) を変えた復元画像をいくつかディスプレイ 1 8 2 に表示する。このとき、使用者が、例えば、操作部 1 3 0 (タッチパネルなど) を介して、ディスプレイ 1 8 2 に表示された複数の復元画像の中から、最適な復元画像

50

を選択すると、復元画像が決定される。なお、使用者の選択の履歴をデータとして蓄積することによって、使用者の好みに合った復元モード（観測遷移行列 M_{p-1} の各要素 $h_{r,s}$ の値）を自動で選択することも可能となる。

【0134】

このように、本実施の形態によれば、ARシステムのコンセプトを必要としない新しい状態空間モデル（状態方程式と観測方程式）を構成して1段階処理の新しい予測法によって画像復元を行うため、シンプルで実用的かつ高性能な画像復元を実現することができる。すなわち、AR次数の決定およびAR係数を推定するステップを必要としないシンプルな構成で、かつ、非定常性が強い自然画像に対しても有効に復元処理を行うことができる実用性を有し、しかも、従来手法1～3に比べて画像復元能力を向上することができる。

10

【0135】

また、本実施の形態では、上記のように、ARシステムのコンセプトを必要としないため、画像の撮り直しが許されない場面にも広く適用可能である。なお、もちろん、ここでも、上記のように、画像の種類は限定されず、静止画像でも動画画像でもよい。

【0136】

例えば、古文書の傷や汚れなどをぼけや雑音とみなし、発明手法1を用いてこれらを取り除き、文字・物体認識技術を用いることによって、古文書の解読、復元、およびデジタルデータベース化に効果を発揮することが期待される。

【0137】

また、防犯分野においても、近年、防犯カメラ（監視カメラ）などの設置が普及しつつあり、犯罪者の多くは防犯カメラなどに撮影されていることが多いため、この画像が犯罪者の発見の手がかりとなることがある。しかし、これらの画像は一般に画質が荒く、動いている対象物の画像はぼけが生じていることが一般的である。また、これらの画像を拡大した場合には、通常、画像はより一層劣化する。そこで、拡大画像を含めてこれらの劣化画像に発明手法1を適用することによって、劣化画像のぼけと雑音を取り除き、クリアな画像を提供することで、犯罪者の早期発見につながることを期待される。なお、このように、拡大画像を含めて劣化画像に発明手法1を適用することによって、劣化画像のぼけと雑音を取り除き、クリアな画像を提供することは、防犯分野に限らず、監視カメラなどで撮影された画像に基づいて、事故の判定や器具の故障診断などを行う場合にも適用可能である。

20

30

【0138】

また、近年、カメラ機能付き携帯電話やデジタルカメラなどが急速な勢いで普及し、1人1台の時代となっている。しかし、これらの製品に搭載されている画像復元技術は、顔認識やフィルタなどのぼけや雑音を予防する技術であり、撮り直しが許されない場面を想定していない。したがって、これらの製品に発明手法1を適用することによって、撮り直しが許されない瞬間的な画像復元が可能になる。

【0139】

また、医療の分野において、健康を調査する最も効果的な手段の1つとして、内視鏡やレントゲン、エコー、CT、MRIなどの画像診断がある。例えば、肺や心臓などの画像診断では、肺や心臓などの動作によってぼけと雑音を含んだ情報から健康診断を行っている。これらの画像診断に発明手法を適用してぼけと雑音を取り除くことによって、専門医にクリアな画像を迅速に提供することが可能となり、病気の早期発見の一助になることが期待される。

40

【0140】

また、近年カーナビゲーションシステムが普及していることから、フロント・リアカメラを搭載した自動車も増えている。このようなリアルタイムで画像復元処理が必要な自動車のフロント・リアカメラなどの場合においても発明手法1は有効である。

【0141】

なお、上記のように、本発明に係る画像復元方法の具体的な手法（発明手法）は、発明手法1に限定されない。以下では、他の発明手法として、5つの発明手法2～6を順次説

50

明する。ただし、発明手法 1 ~ 6 相互間の比較を容易にするため、上記した発明手法 1 についても簡単にまとめて説明しておく。また、共通する部分については、適宜、その説明を省略する。

【0142】

< 発明手法 1 >

まず、各発明手法 1 ~ 6 に共通の問題設定として、画像復元の理論となる画像劣化モデルについて、再度、簡単に説明しておく。図 29 は、劣化画像モデルを視覚的に説明するための図である（図 3、式（1）参照）。

【0143】

画像の劣化は、図 29 の上側に示すように、原画像にぼけと雑音加わることによって生じる。ぼけは、ある画素がその周囲の画素に影響することによって生じるが、雑音は、画素に関係なく発生する。カメラなどで撮影された画像の場合、ぼけは、手ぶれや焦点ずれなどに起因して生じ、雑音は、暗電流や熱雑音などに起因して不可避免的に発生する。劣化画像は、一般的に、原画像とぼけの点拡がり関数（PSF）の畳み込み（コンボリューション）に雑音を加えたモデルによって得られる。具体的には、劣化画像 $g(x, y)$ は、原画像を $f(m, n)$ 、ぼけの点拡がり関数を $h(x, y)$ 、雑音を $n(x, y)$ でそれぞれ表すと、図 29 に示す劣化画像生成式で表される。この劣化画像モデルでは、雑音 $n(x, y)$ と原画像 $f(m, n)$ は無相関であること、雑音 $n(x, y)$ は加法性白色ガウス雑音であること、が条件となっている。劣化画像の復元は、劣化画像からぼけと雑音を取り除くことにほかならない。

【0144】

図 30 は、発明手法 1 の状態空間モデルを視覚的に説明するための図、図 31 は、発明手法 1 の状態過程を視覚的に説明するための図、図 32 は、発明手法 1 の観測過程を視覚的に説明するための図である（以上、図 4 ~ 図 11、式（2）~ 式（4）参照）。

【0145】

発明手法 1 では、図 30 にまとめて示すように、新しい状態空間モデル（状態方程式と観測方程式）を構成し、定式化している。この状態空間モデルは、状態過程と観測過程とで構成される。状態過程は、図 31 に示すように、状態方程式によって記述され、観測過程は、図 32 に示すように、観測方程式によって記述される。ここで、状態方程式において、ベクトル $x_{p1}(n)$ は状態ベクトル（原画像情報）、行列 Φ_{p1} は状態遷移行列、ベクトル $\delta_{p1}(n)$ は駆動源ベクトルである。また、観測方程式において、ベクトル $y_{p1}(n)$ は観測ベクトル（観測画像情報、劣化画像情報）、行列 M_{p1} は観測遷移行列、ベクトル $\varepsilon_{p1}(n)$ は観測雑音ベクトルである。また、ベクトル $x_{p1}(n)$ 、 $\delta_{p1}(n)$ 、 $y_{p1}(n)$ 、 $\varepsilon_{p1}(n)$ の変数としての「 n 」は、装置の時刻 n である。時刻 n は、注目画素（または注目画素領域）と複数の周辺画素（または周辺画素領域）とからなる処理対象ブロックの処理の順番（ n 番目）を表している。状態方程式は、観測対象のシステムを状態空間モデルで記述したものであり、内部状態つまり状態変数（ここでは、状態ベクトル $x_{p1}(n)$ 、 $x_{p1}(n+1)$ ）の時間に対する生成過程を表している。また、観測方程式は、何らかの観測装置を通じて観測する過程を記述したものであり、観測結果（ここでは、観測ベクトル $y_{p1}(n)$ ）が、被観測量つまり入力（ここでは、状態ベクトル $x_{p1}(n)$ ）に依存して生成される様子を示している。

【0146】

図 33 は、発明手法 1 の状態方程式と観測方程式をまとめて示す説明図であり、図 34 は、発明手法 1 のアルゴリズムを説明するための図である（図 12、図 14、式（5）~ 式（10）参照）。なお、式の表記法として、ここでは、一般に、アルファベットの小文字「 α_y 」は、サイズが $y \times 1$ のベクトルを表し、アルファベットの太文字「 B_y 」は、サイズが $y \times y$ の行列を表している。

【0147】

図 33 に示す状態方程式および観測方程式、ならびに図 34 に示すアルゴリズムにおいて、 K_1 は周辺画素領域（厳密には処理対象ブロック）に含まれる画素数であり、 m 、 n

をそれぞれ周辺画素領域の縦軸と横軸の長さとした場合、 $K_1 = m \times n$ で表される。すなわち、発明手法 1 では、劣化画像の復元処理は、復元対象である注目画素のみを用いるのではなく、その周辺の画素も含めて処理を行う。具体的には、例えば、 $J \times J$ の大きさの画像のある注目画素を中心にして、その周辺 $m \times n$ （ただし、 $J > m, n$ ）の領域を処理対象ブロックとし、この処理対象ブロックの中の画素情報を用いて、画像の復元処理を行う。処理対象ブロックは、画像復元において $m \times n$ の画素を用いて処理を行う範囲を意味する。図 3 3 および図 3 4 の右下には、 $K_1 = 9 (= 3 \times 3)$ の場合の処理対象ブロックが例示されている。

【 0 1 4 8 】

図 3 5 は、図 3 4 のアルゴリズムを実行する処理手順を示すフローチャートである（図 1 3 参照）。 10

【 0 1 4 9 】

ここでは、図 3 4 のアルゴリズムの表記に対応して、行列とベクトルのサイズをそれぞれ明記している。具体的には、 $n \rightarrow (n+1)$ の推定誤差の相関値（行列）（ $S 1 1 0 0$ ）は、サイズが $K_1 \times K_1$ の行列、重み係数（行列）（ $S 1 2 0 0$ ）は、サイズが $K_1 \times K_1$ の行列、 $n \rightarrow (n+1)$ の状態量の最適推定値（ベクトル）（ $S 1 3 0 0$ ）は、サイズが $K_1 \times 1$ のベクトル、 $(n+1) \rightarrow (n+1)$ の状態量の最適推定値（ベクトル）（ $S 1 4 0 0$ ）は、サイズが $K_1 \times 1$ のベクトル、 $(n+1) \rightarrow (n+1)$ の推定誤差の相関値（行列）（ $S 1 6 0 0$ ）は、サイズが $K_1 \times K_1$ の行列となる。

【 0 1 5 0 】

< 発明手法 2 >

図 3 6 は、発明手法 1 の課題を視覚的に説明するための図である。

【 0 1 5 1 】

発明手法 1 では、図 3 6 に示すように、時刻 n の変化は、画素領域（処理対象ブロック）の遷移を用いて表される。時刻 $n+1$ では、例えば、過去の 1 時刻前の 9（ $= 3 \times 3$ ）個の状態量（原画像の画素情報） $x_1 \sim x_9$ を用いて、現在の処理対象ブロックの 9（ $= 3 \times 3$ ）個の状態量（原画像の画素情報） $x_4 \sim x_{12}$ を推定することにより、注目画素領域の状態量 x_8 を復元する。このように、発明手法 1 では、1 つの注目画素領域の状態量（要素）を復元するために、処理対象ブロック内の状態量（要素）をすべて推定している。しかし、そもそも、1 つの注目画素領域の要素を復元するためには、その注目画素領域の要素のみを求めればよく、他の要素の推定は不要である。そこで、発明手法 2 では、注目画素領域のみを考慮した状態空間モデルを再構成する。具体的には、発明手法 2 では、発明手法 1 の観測方程式を再構成して注目画素領域の要素のみを抽出するようにしている。これにより、発明手法 2 では、発明手法 1 に対して大幅な演算量の軽減を可能にして、高速（低演算量）な劣化画像復元を実現している。 30

【 0 1 5 2 】

図 3 7 は、発明手法 2 の状態方程式の構成を視覚的に示す説明図であり、特に、（A）は、発明手法 1 の状態方程式の具体例を示す図、（B）は、時刻の変化に伴う処理対象ブロックの変化を示す図である。なお、図 3 7 に示すように、発明手法 2 の状態方程式は、発明手法 1 の状態方程式と全く同じであるため、その説明を省略する。 40

【 0 1 5 3 】

図 3 8 は、発明手法 2 の観測方程式の構成を視覚的に示す説明図であり、図 3 9 は、発明手法 2 の観測方程式の構成を視覚的に示す他の説明図である。

【 0 1 5 4 】

発明手法 2 では、図 3 8 に示すように、発明手法 1 の観測方程式において注目画素領域の要素（例えば、画素情報 $y_5(n)$ ）のみを抽出して観測方程式を再構成する。これにより、発明手法 2 では、図 3 9 に示すように、発明手法 1 における観測ベクトル $y_{p1}(n)$ 、観測遷移行列 M_{p1} 、観測雑音ベクトル $\varepsilon_{p1}(n)$ が、それぞれ、スカラー化、ベクトル化、スカラー化されて、観測値 $y_{p2}(n)$ 、観測遷移ベクトル m_{p2}^T 、観測雑音 $\varepsilon_{p2}(n)$ となる。この結果、発明手法 2 は、発明手法 1 に対して、サイズが縮小 50

されるため、演算量が大幅に軽減される。なお、演算量の軽減効果については、後で詳述する。

【0155】

図40は、発明手法2の状態方程式と観測方程式をまとめて示す説明図であり、図41は、発明手法2のアルゴリズムを説明するための図である。なお、式の表記法として、ここでは、一般に、アルファベットの小文字「 α_y 」は、サイズが $y \times 1$ のベクトルを表し、アルファベットの太文字「 B_y 」は、サイズが $y \times y$ の行列を表している。

【0156】

図40に示す状態方程式および観測方程式、ならびに図41に示すアルゴリズムにおいて、 K_2 は周辺画素領域（厳密には処理対象ブロック）に含まれる画素数であり、 m 、 n をそれぞれ周辺画素領域の縦軸と横軸の長さとした場合、 $K_2 = m \times n$ で表される。発明手法2のアルゴリズムは、図42に示すように、初期設定（Initialization）の過程と反復（Iteration）の過程とに大別され、反復過程は、発明手法1の場合（図34参照）よりも演算量が軽減されるよう、図40に示す新しい状態空間モデル（状態方程式と観測方程式）を基に構成されている。反復過程では、1～6の手順を逐次繰り返す。

【0157】

図42は、図41のアルゴリズムを実行する処理手順を示すフローチャートである。

【0158】

上記のように、発明手法2では、図39に示すように、発明手法1における観測ベクトル $y_{p1}(n)$ 、観測遷移行列 M_{p1} 、観測雑音ベクトル $\varepsilon_{p1}(n)$ が、それぞれ、スカラー化、ベクトル化、スカラー化されて、観測値 $y_{p2}(n)$ 、観測遷移ベクトル m_{p2}^T 、観測雑音 $\varepsilon_{p2}(n)$ となっている。これにより、図42のフローチャートにおいて、 $n \rightarrow (n+1)$ の推定誤差の相関値（S3100）は、サイズが $K_2 \times K_2$ の行列、重み係数（S3200）は、サイズが $K_2 \times 1$ のベクトル、 $n \rightarrow (n+1)$ の状態量の最適推定値（S3300）は、サイズが $K_2 \times 1$ のベクトル、 $(n+1) \rightarrow (n+1)$ の状態量の最適推定値（S3400）は、サイズが $K_2 \times 1$ のベクトル、 $(n+1) \rightarrow (n+1)$ の推定誤差の相関値（S3600）は、サイズが $K_2 \times K_2$ の行列となる。

【0159】

図43は、発明手法1と発明手法2のアルゴリズムを比較した説明図である。

【0160】

図43に示すように、発明手法1のアルゴリズムでは、逆行列の計算が必要である（反復過程つまり更新式の手順2参照）。一般に、逆行列の計算は複雑であり、演算量が多い。これに対し、発明手法2では、上記したサイズの縮小により、発明手法1における逆行列の計算が、スカラーの逆数の計算となる（反復過程つまり更新式の手順2参照）。スカラーの逆数の計算は簡単であり、演算量は1回で済む。したがって、発明手法2は、発明手法1よりも演算量が大幅に軽減される。

【0161】

図44は、発明手法2の演算量評価を説明するための図である。なお、ここで、従来手法3は、カルマンフィルタを用いた画像復元手法（例えば、非特許文献6参照）である。ただし、非特許文献6に記載された手法は、原画像に雑音に加わった劣化画像にしか対応できないため、本発明者は、非特許文献6に記載された手法をばけと雑音に対応できるように拡張した上で、以下の各種比較（シミュレーションを含む）を行った。

【0162】

図44において、演算量は、乗算の回数によって表される。図44の上側に、従来手法3、発明手法1、および発明手法2に対する、更新1回当たりの演算回数の比較結果を示す。これに基づき、更新1回当たりの演算量（乗算回数）を求めると、図44の中央左側に示す棒グラフが得られる。この棒グラフから明らかなように、発明手法2は、発明手法1よりも演算量が大幅に減少している。演算量の減少効果で見た場合、その大小関係は、従来手法3 < 発明手法1 < 発明手法2、となる。したがって、発明手法2は、大幅な演算量の軽減を実現している。

10

20

30

40

50

【 0 1 6 3 】

図 4 5 は、発明手法 2 の復元処理速度評価を説明するための図である。

【 0 1 6 4 】

ここでは、各手法の処理速度を比較するために、図 4 5 に示すスペック表に基づいて、サイズが異なる 2 種類の画像の処理時間を測定した。その結果、発明手法 1 および発明手法 2 は、いずれも、従来手法 3 と比較して、A R 係数推定（導出）の演算量が不要であるため、処理速度が速くなっている。また、発明手法 2 は、上記のように発明手法 1 よりも演算量が大幅に少ないため、発明手法 1 よりも高速な処理が可能となっている。処理速度で見た場合、その大小関係は、図 4 5 に示すように、従来手法 3 < 発明手法 1 < 発明手法 2、となる。したがって、発明手法 2 は、高速な画像復元処理が可能である。

10

【 0 1 6 5 】

また、本発明者は、発明手法 2 の有効性を検証するためにシミュレーションを行った。具体的には、発明手法 2 の画像復元能力を評価するために、視覚評価と客観評価を行った。視覚評価は、原画像と復元画像とを視覚により比較した評価であり、客観評価は、数値による評価である。

【 0 1 6 6 】

図 4 6 は、シミュレーションの条件を説明するための図である。

【 0 1 6 7 】

本シミュレーションでも、図 1 5 のシミュレーション条件と同様に、原画像として、「カメラマン（Cameraman）」と「レナ（Lenna）」を用いた（画像サイズは共に 2 5 6 × 2 5 6）。また、原画像に加えるぼけに対応する点拡がり関数（P S F）のモデルとして、図 1 5 に示す 2 次元ガウス関数を用い、雑音として、加法性白色ガウス雑音を用いた。また、信号対雑音比 S N R を 2 0 d B とした。

20

【 0 1 6 8 】

図 4 7 は、比較対象手法との対比において原画像「カメラマン」に対する発明手法 2 のシミュレーション結果（視覚評価）を示す図であり、図 4 8 は、図 4 7 中の破線の円の周辺領域を拡大した図である。また、図 4 9 は、比較対象手法との対比において原画像「レナ」に対する発明手法 2 のシミュレーション結果（視覚評価）を示す図であり、図 5 0 は、図 4 9 中の破線の円の周辺領域を拡大した図である。なお、ここで、比較対象手法は、従来手法 3 と発明手法 1 である。

30

【 0 1 6 9 】

図 4 7 ~ 図 5 0 に示すように、発明手法 1 および発明手法 2 は、従来手法 3 に比べて、明らかに原画像を忠実に復元していることがわかる。ただし、発明手法 1 と発明手法 2 を比較した場合、画像復元能力はほぼ同等のレベルであるといえる。

【 0 1 7 0 】

図 5 1 は、比較対象手法との対比において原画像に対する発明手法 2 のシミュレーション結果（客観評価）を示す図である。

【 0 1 7 1 】

ここでは、従来手法 3、発明手法 1、および発明手法 2 の画像復元能力を数値により評価するため、図 5 1 に示す P S N R（Peak Signal-to-Noise Ratio）（式（11）参照）を用いて画像復元能力を評価した。なお、P S N R は、画像の似かよ度を示す値であり、値が大きいほど劣化（ぼけや雑音など）が少なく画像として良好であるといえる。

40

【 0 1 7 2 】

この場合、図 5 1 に示すように、「カメラマン」、「レナ」どちらの画像についても、発明手法 1 および発明手法 2 は、従来手法 3 よりも P S N R の数値が大きいことが確認できる。これにより、発明手法 1 および発明手法 2 は、客観評価の点でも、従来手法 3 に比べて画像復元能力が高いことがわかる。一方、発明手法 1 と発明手法 2 を比較した場合には、発明手法 1 よりも発明手法 2 のほうが若干高い客観評価（数値による評価）となっている。これにより、客観評価の大小（良否）関係は、図 5 1 に示すように、従来手法 3 < 発明手法 1 < 発明手法 2、となる。ただし、この若干の差異は、図 4 7 ~ 図 5 0 の比較が

50

らわかるように、ほぼないに等しい。

【 0 1 7 3 】

以上より、発明手法 2 は、発明手法 1 に対して、画像復元能力をほぼ維持しながら、演算量を大幅に軽減して高速な画像復元処理を実現していることがわかる。

【 0 1 7 4 】

< 発明手法 3 >

図 5 2 は、発明手法 2 の課題を視覚的に説明するための図である。

【 0 1 7 5 】

発明手法 2 は、上記のように、発明手法 1 に対して、演算量を大幅に軽減して高速な画像復元処理を実現することができるものの、画像復元能力が若干低下している。これは、図 5 2 に示すように、発明手法 2 の観測方程式において、有色性駆動源の影響が大きい領域が含まれていないためであると考えられる。そこで、発明手法 3 では、注目画素領域のみでなく有色駆動源をも考慮した状態空間モデルを再構成する。すなわち、発明手法 3 では、有色性駆動源の影響を最大限に与えるように状態空間モデルを再構成する。

【 0 1 7 6 】

図 5 3 は、発明手法 3 の観測方程式の構成を視覚的に示す説明図であり、図 5 4 は、発明手法 3 の状態空間モデルを視覚的に説明するための図である。なお、発明手法 3 の状態方程式は、発明手法 2（ひいては発明手法 1）の状態方程式と全く同じであるため、その説明を省略する。

【 0 1 7 7 】

発明手法 3 では、図 5 3 に示すように、発明手法 1 の観測方程式において、注目画素領域の要素（例えば、画素情報 $y_5(n)$ ）に加えて、有色性駆動源の影響を受ける領域の要素（例えば、画素情報 $y_7(n)$ 、 $y_8(n)$ 、 $y_9(n)$ ）をも抽出して観測方程式を再構成する。すなわち、発明手法 3 では、有色性駆動源の影響を考慮するために、発明手法 2 と比較して、画素情報 $y_7(n)$ 、 $y_8(n)$ 、 $y_9(n)$ をも取り入れる。これにより、発明手法 3 では、発明手法 1 における観測ベクトル $y_{p1}(n)$ 、観測遷移行列 M_{p1} 、および観測雑音ベクトル $\varepsilon_{p1}(n)$ は、サイズがそれぞれ縮小されて、観測ベクトル $y_{p3}(n)$ 、観測遷移行列 M_{p3} 、観測雑音ベクトル $\varepsilon_{p3}(n)$ となる。このように、発明手法 3 では、図 5 4 に示すように、状態方程式における有色性駆動源の影響を最大限に考慮するべく、注目画素領域と有色性駆動源の影響を受ける領域とから観測方程式を再構成する。これにより、発明手法 3 は、発明手法 2 の場合よりもサイズの縮小は小さいものの、発明手法 1 に対してサイズが縮小されるため、演算量は大幅に軽減される。

【 0 1 7 8 】

図 5 5 は、発明手法 3 の状態方程式と観測方程式をまとめて示す説明図であり、図 5 6 は、発明手法 3 のアルゴリズムを説明するための図である。なお、式の表記法として、ここでは、一般に、アルファベットの小文字「 α_y 」は、サイズが $y \times 1$ のベクトルを表し、アルファベットの大文字「 B_y 」は、サイズが $y \times y$ の行列を表し、アルファベットの大文字「 $C_{(y \times z)}$ 」は、サイズが $y \times z$ の行列を表している。

【 0 1 7 9 】

図 5 5 に示す状態方程式および観測方程式、ならびに図 5 6 に示すアルゴリズムにおいて、 K_3 は周辺画素領域（厳密には処理対象ブロック）に含まれる画素数であり、 m 、 n をそれぞれ周辺画素領域の縦軸と横軸の長さとした場合、 $K_3 = m \times n$ で表される。また、 L_3 は、注目画素領域と有色性駆動源を含む領域とを合わせた領域に含まれる画素数であり、 $L_3 = 1 + m$ で表される（ $L_3 < K_3$ ）。発明手法 3 のアルゴリズムは、図 5 6 に示すように、初期設定（Initialization）の過程と反復（Iteration）の過程とに大別され、反復過程は、発明手法 2 の場合（図 4 1 参照）よりも演算量が若干増加するものの、発明手法 1 の場合（図 3 4 参照）よりも演算量が軽減されるよう、図 5 5 に示す新しい状態空間モデル（状態方程式と観測方程式）を基に構成されている。反復過程では、1～6 の手順を逐次繰り返す。

【 0 1 8 0 】

図 5 7 は、図 5 6 のアルゴリズムを実行する処理手順を示すフローチャートである。

【 0 1 8 1 】

上記のように、発明手法 3 では、図 5 3 に示すように、発明手法 1 における観測ベクトル $y_{p1}(n)$ 、観測遷移行列 M_{p1} 、観測雑音ベクトル $\varepsilon_{p1}(n)$ は、サイズがそれぞれ縮小されて（つまり、 $L_3 < K_3$ ）、観測ベクトル $y_{p3}(n)$ 、観測遷移行列 M_{p3} 、観測雑音ベクトル $\varepsilon_{p3}(n)$ となっている。これにより、図 5 7 のフローチャートにおいて、 $n \rightarrow (n+1)$ の推定誤差の相関値 ($S4100$) は、サイズが $K_3 \times K_3$ の行列、重み係数 ($S4200$) は、サイズが $K_3 \times L_3$ の行列、 $n \rightarrow (n+1)$ の状態量の最適推定値 ($S4300$) は、サイズが $K_3 \times 1$ のベクトル、 $(n+1) \rightarrow (n+1)$ の状態量の最適推定値 ($S4400$) は、サイズが $K_3 \times 1$ のベクトル、 $(n+1) \rightarrow (n+1)$ の推定誤差の相関値 ($S4600$) は、サイズが $K_3 \times K_3$ の行列となる。

10

【 0 1 8 2 】

図 5 8 は、発明手法 3 の演算量評価を説明するための図である。

【 0 1 8 3 】

図 5 8 の上側に、発明手法 3 に対する、更新 1 回当たりの演算回数（乗算回数）を示す。これに基づき、更新 1 回当たりの演算量（乗算回数）を求め、得られた結果を図 4 4 に示す棒グラフに加えると、図 5 8 の中央左側に示す棒グラフが得られる。この棒グラフから明らかなように、発明手法 3 は、発明手法 1 よりも演算量は大幅に少ない。演算量の減少効果で見た場合、その大小関係は、従来手法 3 < 発明手法 1 < 発明手法 3 < 発明手法 2

20

【 0 1 8 4 】

図 5 9 は、発明手法 3 の復元処理速度評価を説明するための図である。

【 0 1 8 5 】

ここでは、図 4 5 の結果に、発明手法 3 の測定結果を追加した。その結果、発明手法 3 も、従来手法 3 と比較して、AR 係数推定（導出）の演算量が不要であるため、処理速度が速くなっている。また、発明手法 3 は、上記のように発明手法 1 よりも演算量が大幅に少ないため、発明手法 1 よりも高速な処理が可能となっている。発明手法 3 は、発明手法 2 よりも処理速度が若干遅い程度である。処理速度で見た場合、その大小関係は、図 5 9 に示すように、従来手法 3 < 発明手法 1 < 発明手法 3 < 発明手法 2、となる。したがって

30

【 0 1 8 6 】

図 6 0 は、比較対象手法との対比において原画像「カメラマン」に対する発明手法 3 のシミュレーション結果（視覚評価）を示す図であり、図 6 1 は、図 6 0 中の破線の円の周辺領域を拡大した図である。また、図 6 2 は、比較対象手法との対比において原画像「レナ」に対する発明手法 3 のシミュレーション結果（視覚評価）を示す図であり、図 6 3 は、図 6 2 中の破線の円の周辺領域を拡大した図である。なお、シミュレーション条件は、図 4 6 に示す通りである。また、ここでの比較対象手法は、従来手法 3 と発明手法 1 である。

【 0 1 8 7 】

図 6 0 ~ 図 6 3 に示すように、発明手法 3 は、従来手法 3 に比べて、明らかに原画像を忠実に復元していることがわかる。しかも、発明手法 1 と比較しても、画像復元能力は、発明手法 3 のほうが高いことがわかる。

40

【 0 1 8 8 】

図 6 4 は、比較対象手法との対比において原画像に対する発明手法 3 のシミュレーション結果（客観評価）を示す図である。

【 0 1 8 9 】

この場合、図 6 4 に示すように、「カメラマン」、「レナ」どちらの画像についても、発明手法 3 は、他のどの手法（従来手法 3 はもとより発明手法 1 および発明手法 2）よりも PSNR の数値が大きいことが確認できる。これにより、発明手法 3 は、客観評価の点

50

でも、他の手法（従来手法 3、発明手法 1、発明手法 2）に比べて画像復元能力が高いことがわかる。これにより、客観評価（数値による評価）の大小（良否）関係は、図 6 4 に示すように、従来手法 3 < 発明手法 1 < 発明手法 2 < 発明手法 3、となる。

【 0 1 9 0 】

以上より、発明手法 3 は、発明手法 2 よりも演算量を若干増加させつつも、発明手法 1 および発明手法 2 よりも高い良好な画像復元能力を発揮することができる高速な画像復元処理を実現していることがわかる。

【 0 1 9 1 】

< 発明手法 4 >

図 6 5 は、1 次元の画像復元手法の特徴を説明するための図である。

10

【 0 1 9 2 】

発明手法 1 ~ 3 は、1 次元の画像復元手法である。1 次元の画像復元手法である発明手法 1 ~ 3 では、図 6 5 に示すように、周辺画素領域を用いて注目画素領域（1 画素のみ）を復元する。このとき、画像復元手法は、用途や状況などに応じて適用可能である。例えば、上記のように、発明手法 2 は、発明手法 1 に比べて、高速（低演算量）な画像復元手法であり、発明手法 3 は、発明手法 2 よりも演算量は若干多いが、発明手法 1 および発明手法 2 よりも画像復元能力を向上させた手法であるため、処理速度を優先したい場合には発明手法 2 を適用し、画質を優先したい場合には発明手法 3 を適用する、という使い方が可能である。

【 0 1 9 3 】

20

図 6 6 は、2 次元の画像復元手法の特徴を説明するための図である。

【 0 1 9 4 】

発明手法 4 では、1 次元の発明手法 1 を 2 次元に拡張した 2 次元の画像復元手法を提案する。発明手法 4 では、発明手法 1 の場合よりも注目画素領域を大きくとることにより、更新回数を軽減して処理効率のよい復元が可能となる。そのため、発明手法 4 では、発明手法 1 における画素領域（1 画素のみ）を、縦と横の任意の長さを p 、 q とした画素領域に拡張する（以下「画素領域の 2 次元化」ともいう）。1 つの画素領域が $p = q = 2$ 、かつ、処理対象ブロック（注目画素領域と周辺画素領域とからなる）が $3 p q \times 3 p q$ の場合の例を、図 6 6 に示す。画素領域の 2 次元化に当たり、画素領域のサイズおよび処理対象ブロックのサイズは、それぞれ、自由に選択可能である。画素領域の 2 次元化により、注目画素領域の画素数が多くなるため、処理の効率化が図られる。また、 $p = q = 1$ の場合、注目画素領域は 1 次元の画像復元手法（発明手法 1 ~ 3）と等しくなるため、2 次元の画像復元手法である発明手法 4 は、柔軟性のある手法といえる。なお、上記のように、1 次元カルマンフィルタを 2 次元に拡張した 2 次元カルマンフィルタも知られているが、2 次元カルマンフィルタも、1 次元カルマンフィルタと同様に、AR 係数を用いるため、AR 係数の推定精度に起因する画像復元能力の低下は避けられない。これを解決するためには、AR 係数を必要としない新しい予測法を提案して、2 次元カルマンフィルタの状態空間モデルを再構成すればよい。発明手法 4 は、まさに、このための新しい手法であり、発明手法 1 を 2 次元に拡張した新しい予測法に基づく画像復元手法である。以下、発明手法 4 について、より詳細に説明する。

30

40

【 0 1 9 5 】

図 6 7 は、発明手法 4 の状態空間モデルを視覚的に説明するための図である。また、図 6 8 は、発明手法 4 の状態過程を視覚的に説明するための図であり、図 6 9 は、発明手法 4 の状態方程式の構成を視覚的に示す説明図である。

【 0 1 9 6 】

状態過程について、発明手法 4 では、図 6 8 に示すように、画素領域として、サイズが $p \times q$ の領域を指定し、指定した画素領域に含まれる画素情報を並べて $p q \times 1$ 次の画素領域ベクトルを生成する。例えば、図 6 8 に示すように、 $p = q = 2$ 、かつ、 $3 p q \times 3 p q$ の領域の場合を例にとると、一番左上の画素領域ベクトル $x_1(n)$ は、4 個の画素情報 $x_1(n)$ 、 $x_2(n)$ 、 $x_3(n)$ 、 $x_4(n)$ を要素とする 4×1 次のベクトル

50

であり、一番右下の画素領域ベクトル $x_9(n)$ は、4 個の画素情報 $x_{33}(n)$ 、 $x_{34}(n)$ 、 $x_{35}(n)$ 、 $x_{36}(n)$ を要素とする 4×1 次のベクトルである。そして、9 個の画素領域に対応する画素領域ベクトル $x_k(n)$ ($k = 1, 2, \dots, 9$) を並べて状態ベクトル $x(n)$ を表現する。すなわち、発明手法 4 では、図 69 に示すように、画素領域を、発明手法 1 における画素情報と対応付けて、同様の処理を行う。

【0197】

図 70 は、発明手法 4 の観測過程を視覚的に説明するための図であり、図 71 は、発明手法 4 の観測方程式の構成を視覚的に示す説明図である。

【0198】

観測過程についても、発明手法 4 では、図 70 に示すように、画素領域として、サイズが $p \times q$ の領域を指定し、指定した画素領域に含まれる画素情報を並べて $p \times q \times 1$ 次の画素領域ベクトルを生成する。例えば、図 70 に示すように、 $p = q = 2$ 、かつ、 $3 \times 3 \times 3 \times 3$ の領域の場合を例にとると、一番左上の画素領域ベクトル $y_1(n)$ は、4 個の画素情報 $y_{11}(n)$ 、 $y_{12}(n)$ 、 $y_{13}(n)$ 、 $y_{14}(n)$ を要素とする 4×1 次のベクトルであり、一番右下の画素領域ベクトル $y_9(n)$ は、4 個の画素情報 $y_{33}(n)$ 、 $y_{34}(n)$ 、 $y_{35}(n)$ 、 $y_{36}(n)$ を要素とする 4×1 次のベクトルである。そして、9 個の画素領域に対応する画素領域ベクトル $y_k(n)$ ($k = 1, 2, \dots, 9$) を並べて観測ベクトル $y(n)$ を表現する。すなわち、発明手法 4 では、図 71 に示すように、画素領域を、発明手法 1 における画素情報と対応付けて、同様の処理を行う。

【0199】

図 72 は、発明手法 4 の観測遷移行列の、 $p = q = 2$ 、かつ、 $3 \times 3 \times 3 \times 3$ の領域の場合の具体例を示す図であり、図 73 は、図 72 の観測遷移行列の構成を視覚的に示す説明図である。また、図 74 は、図 72 の観測遷移行列を構成する係数の割り当て方法の具体例を示す図、図 75 は、図 72 の観測遷移行列を構成する係数の割り当て方法の具体例を示す他の図、図 76 は、図 72 の観測遷移行列を構成する係数の割り当て方法の具体例を示すさらに他の図である。

【0200】

ここでは、発明手法 4 の観測遷移行列を構成する $3 \times 3 (= 9)$ 個の係数 $h_{r,s}$ (座標 $r, s = -1, 0, 1$) は、発明手法 1 の場合と同じであり、画素情報を単位として見たときに、発明手法 1 の場合と同様の関係が成り立つように、割り当てられている。係数 $h_{r,s}$ ($r, s = -1, 0, 1$) の具体的な割り当て方法は、画素情報を単位としたときの観測量 y_i の位置に応じて、図 74 ~ 図 76 にそれぞれ示す通りである。

【0201】

図 77 は、発明手法 4 の状態方程式と観測方程式をまとめて示す説明図であり、図 78 は、発明手法 4 のアルゴリズムを説明するための図である。なお、式の表記法として、ここでは、一般に、アルファベットの小文字「 α_y 」は、サイズが $y \times 1$ のベクトルを表し、アルファベットの太文字「 B_y 」は、サイズが $y \times y$ の行列を表している。

【0202】

図 77 に示す状態方程式および観測方程式、ならびに図 78 に示すアルゴリズムにおいて、 K_4 は周辺画素領域 (厳密には処理対象ブロック) に含まれる画素数であり、 m 、 n をそれぞれ周辺画素領域の縦軸と横軸の長さとした場合、 $K_4 = m \times n$ で表される。ここで、 m 、 n は、それぞれ、 $m = l_m \times p$ 、 $n = l_n \times q$ で表される。 p 、 q は、それぞれ、注目画素領域の縦軸と横軸の長さであり、 l_m 、 l_n は、それぞれ、 $p \times q$ と同等のサイズを周辺画素領域の縦軸と横軸に構成した数である。

【0203】

図 79 は、図 78 のアルゴリズムを実行する処理手順を示すフローチャートである。

【0204】

ここでは、図 78 のアルゴリズムの表記に対応して、行列とベクトルのサイズをそれぞれ明記している。具体的には、 $n \rightarrow (n+1)$ の推定誤差の相関値 (行列) ($S5100$) は、サイズが $K_4 \times K_4$ の行列、重み係数 (行列) ($S5200$) は、サイズが $K_4 \times$

10

20

30

40

50

K_4 の行列、 $n \rightarrow (n+1)$ の状態量の最適推定値 (ベクトル) $(S5300)$ は、サイズが $K_4 \times 1$ のベクトル、 $(n+1) \rightarrow (n+1)$ の状態量の最適推定値 (ベクトル) $(S5400)$ は、サイズが $K_4 \times 1$ のベクトル、 $(n+1) \rightarrow (n+1)$ の推定誤差の相関値 (行列) $(S5600)$ は、サイズが $K_4 \times K_4$ の行列となる。

【0205】

図80は、発明手法4の演算量評価を説明するための図である。なお、ここで、従来手法4は、2次元カルマンフィルタを用いた画像復元手法 (例えば、非特許文献8参照) である。ただし、非特許文献8に記載された手法は、原画像に雑音加わった劣化画像にしか対応できないため、本発明者は、非特許文献8に記載された手法をぼけと雑音に対応できるように拡張した上で、以下の各種比較 (シミュレーションを含む) を行った。

10

【0206】

図80の上側に、従来手法4および発明手法4に対する、更新1回当たりの演算回数 (乗算回数) を示す。これに基づき、 256×256 サイズの1枚の画像を復元するのに必要な演算量 (乗算回数) を求め、得られた結果を発明手法1に対する結果と一緒に示すと、図80の中央左側に示す棒グラフが得られる。この棒グラフから明らかなように、発明手法4は、従来手法4よりも演算量は少ないが、発明手法1よりも演算量が多い。しかし、発明手法4は、発明手法1に比べて、注目画素領域が広いため、更新回数は少ない。演算量の減少効果で見た場合、その大小関係は、従来手法4 < 発明手法4 < 発明手法1、となる。したがって、発明手法4は、注目画素領域と周辺画素領域のサイズをそれぞれ変化させることにより、効率のよい画像復元が可能である。

20

【0207】

図81は、発明手法4の復元処理速度評価を説明するための図である。

【0208】

ここでは、発明手法1の測定結果に、従来手法4と発明手法4の測定結果を追加した。その結果、発明手法4は、従来手法4と比較して、AR係数推定 (導出) の演算量が不要であるため、処理速度が速くなっている。また、発明手法4は、上記のように発明手法1よりも演算量が多いものの更新回数は少ないため、発明手法1よりも高速な処理が可能となっている。処理速度で見た場合、その大小関係は、図81に示すように、従来手法4 < 発明手法1 < 発明手法4、となる。したがって、発明手法4は、高速な画像復元処理が可能である。

30

【0209】

図82は、比較対象手法との対比において原画像「カメラマン」に対する発明手法4のシミュレーション結果 (視覚評価) を示す図であり、図83は、図82中の破線の円の周辺領域を拡大した図である。また、図84は、比較対象手法との対比において原画像「レナ」に対する発明手法4のシミュレーション結果 (視覚評価) を示す図であり、図85は、図84中の破線の円の周辺領域を拡大した図である。なお、シミュレーション条件は、図46に示す通りである。また、ここでの比較対象手法は、従来手法3と発明手法1である。

【0210】

図82～図85に示すように、発明手法4は、従来手法3に比べて、明らかに原画像を忠実に復元していることがわかる。しかも、発明手法1と比較しても、画像復元能力は、発明手法4のほうが高いことがわかる。

40

【0211】

図86は、比較対象手法との対比において原画像に対する発明手法4のシミュレーション結果 (客観評価) を示す図である。

【0212】

この場合、図86に示すように、「カメラマン」、「レナ」どちらの画像についても、発明手法4は、発明手法3よりもPSNRの数値はやや小さいものの、従来手法3はもとより発明手法1および発明手法2よりもPSNRの数値が大きいことが確認できる。これにより、発明手法4は、客観評価の点でも、従来手法3、発明手法1、および発明手法2

50

に比べて画像復元能力が高いことがわかる。これにより、客観評価（数値による評価）の大小（良否）関係は、図 8 6 に示すように、従来手法 3 < 発明手法 1 < 発明手法 2 < 発明手法 4 < 発明手法 3、となる。

【 0 2 1 3 】

以上より、発明手法 4 は、発明手法 1 よりも演算量は多いものの、発明手法 1 および発明手法 2 よりも高い良好な画像復元能力を発揮することができる高速な画像復元処理を実現していることがわかる。

【 0 2 1 4 】

< 発明手法 5 >

図 8 7 は、発明手法 4 の課題を視覚的に説明するための図である。

10

【 0 2 1 5 】

発明手法 4 では、図 8 7 に示すように、時刻 n の変化は、画素領域（処理対象ブロック）の遷移を用いて表される。時刻 $n + 1$ では、例えば、過去の 1 時刻前の $9 (= 3 \times 3)$ 個の画素領域にそれぞれ含まれる各状態量（原画像の画素情報）を用いて、現在の処理対象ブロックの $9 (= 3 \times 3)$ 個の画素領域にそれぞれ含まれる各状態量（原画像の画素情報）を推定することにより、注目画素領域の状態量 x_{29} 、 x_{30} 、 x_{31} 、 x_{32} を復元する。このように、発明手法 4 では、1 つの注目画素領域に含まれる各状態量（要素）を復元するために、処理対象ブロック内の状態量（要素）をすべて推定している。しかし、そもそも、1 つの注目画素領域内の要素を復元するためには、その注目画素領域内の要素のみを求めればよく、他の要素の推定は不要である。そこで、発明手法 5 では、注目画素領域のみを考慮した状態空間モデルを再構成する。具体的には、発明手法 5 では、発明手法 4 の観測方程式を再構成して注目画素領域に含まれる要素のみを抽出するようにしている。これにより、発明手法 5 では、発明手法 4 に対して大幅な演算量の軽減を可能にして、高速（低演算量）な劣化画像復元を実現している。なお、発明手法 5 は、発明手法 2 を 2 次元に拡張したものともいえる。

20

【 0 2 1 6 】

図 8 8 は、発明手法 5 の状態方程式の構成を視覚的に示す説明図であり、特に、(A) は、発明手法 4 の状態方程式の具体例を示す図、(B) は、時刻の変化に伴う処理対象ブロックの変化を示す図である。なお、図 8 8 に示すように、発明手法 5 の状態方程式は、発明手法 4 の状態方程式と全く同じであるため、その説明を省略する。

30

【 0 2 1 7 】

図 8 9 は、発明手法 5 の観測方程式の構成を視覚的に示す説明図であり、図 9 0 は、発明手法 5 の観測方程式の構成を視覚的に示す他の説明図である。

【 0 2 1 8 】

発明手法 5 では、図 8 9 に示すように、発明手法 4 の観測方程式において注目画素領域に含まれる要素（例えば、画素領域ベクトル $y_5(n)$ ）のみを抽出して観測方程式を再構成する。これにより、発明手法 5 では、図 9 0 に示すように、発明手法 4 における観測ベクトル $y_{p4}(n)$ 、観測遷移行列 M_{p4} 、観測雑音ベクトル $\varepsilon_{p4}(n)$ は、それぞれ、サイズが縮小されて、観測ベクトル $y_{p5}(n)$ 、観測遷移行列 M_{p5} 、観測雑音ベクトル $\varepsilon_{p5}(n)$ となる。この結果、発明手法 5 は、発明手法 4 に対して、サイズが縮小されるため、演算量が大幅に軽減される。なお、演算量の軽減効果については、後で詳述する。

40

【 0 2 1 9 】

図 9 1 は、発明手法 5 の状態方程式と観測方程式をまとめて示す説明図であり、図 9 2 は、発明手法 5 のアルゴリズムを説明するための図である。なお、式の表記法として、ここでは、一般に、アルファベットの小文字「 α_y 」は、サイズが $y \times 1$ のベクトルを表し、アルファベットの大文字「 B_y 」は、サイズが $y \times y$ の行列を表し、アルファベットの大文字「 $C_{(y \times z)}$ 」は、サイズが $y \times z$ の行列を表している。

【 0 2 2 0 】

図 9 1 に示す状態方程式および観測方程式、ならびに図 9 2 に示すアルゴリズムにおい

50

て、 K_5 は周辺画素領域（厳密には処理対象ブロック）に含まれる画素数であり、 m 、 n をそれぞれ周辺画素領域の縦軸と横軸の長さとした場合、 $K_5 = m \times n$ で表される。ここで、 m 、 n は、それぞれ、 $m = l_m \times p$ 、 $n = l_n \times q$ で表される。 p 、 q は、それぞれ、注目画素領域の縦軸と横軸の長さであり、 l_m 、 l_n は、それぞれ、 $p \times q$ と同等のサイズを周辺画素領域の縦軸と横軸に構成した数である。また、 L_5 は、注目画素領域に含まれる画素数であり、 $L_5 = p \times q$ で表される。

【0221】

図93は、図92のアルゴリズムを実行する処理手順を示すフローチャートである。

【0222】

上記のように、発明手法5では、図90に示すように、発明手法4における観測ベクトル $y_{p4}(n)$ 、観測遷移行列 M_{p4} 、観測雑音ベクトル $\varepsilon_{p4}(n)$ は、それぞれ、サイズが $9pq \times 1 \rightarrow pq \times 1$ 、 $9pq \times 9pq \rightarrow pq \times 9pq$ 、 $9pq \times 1 \rightarrow pq \times 1$ に縮小されて（つまり、 $L_5 < K_5$ ）、観測ベクトル $y_{p5}(n)$ 、観測遷移行列 M_{p5} 、観測雑音ベクトル $\varepsilon_{p5}(n)$ となっている。これにより、図93のフローチャートにおいて、 $n \rightarrow (n+1)$ の推定誤差の相関値 ($S6100$) は、サイズが $K_5 \times K_5$ の行列、重み係数 ($S6200$) は、サイズが $K_5 \times L_5$ の行列、 $n \rightarrow (n+1)$ の状態量の最適推定値 ($S6300$) は、サイズが $K_5 \times 1$ のベクトル、 $(n+1) \rightarrow (n+1)$ の状態量の最適推定値 ($S6400$) は、サイズが $K_5 \times 1$ のベクトル、 $(n+1) \rightarrow (n+1)$ の推定誤差の相関値 ($S6600$) は、サイズが $K_5 \times K_5$ の行列となる。

【0223】

図94は、発明手法4と発明手法5のアルゴリズムを比較した説明図である。

【0224】

図94に示すように、発明手法4のアルゴリズムでは、サイズが $9pq \times 9pq$ の逆行列の計算が必要であり（反復過程つまり更新式の手順2参照）、演算量が多い。これに対し、発明手法5では、上記したサイズの縮小により、サイズが $9pq \times 9pq$ の逆行列が、サイズが $pq \times pq$ の逆行列となっている（反復過程つまり更新式の手順2参照）。したがって、発明手法5は、発明手法4よりも演算量が大幅に軽減される。

【0225】

図95は、発明手法5の演算量評価を説明するための図である。

【0226】

図95の上側に、発明手法5に対する、更新1回当たりの演算回数（乗算回数）を示す。これに基づき、 256×256 サイズの1枚の画像を復元するのに必要な演算量（乗算回数）を求め、得られた結果を図80に示す棒グラフに加えると、図95の中央左側に示す棒グラフが得られる。この棒グラフから明らかなように、発明手法5は、従来手法4および発明手法4よりも演算量は大幅に少ない。演算量の減少効果で見た場合、その大小関係は、従来手法4 < 発明手法4 < 発明手法1 < 発明手法5、となる。したがって、発明手法5は、大幅な演算量の軽減が可能であり、高速（低演算量）な画像復元が可能である。

【0227】

図96は、発明手法5の復元処理速度評価を説明するための図

【0228】

ここでは、図81の結果に、発明手法5の測定結果を追加した。その結果、発明手法5も、従来手法4と比較して、AR係数推定（導出）の演算量が不要であるため、処理速度が速くなっている。また、発明手法5は、上記のように発明手法1および発明手法4よりも演算量が少ないため、発明手法1および発明手法4よりも高速な処理が可能となっている。処理速度で見た場合、その大小関係は、図96に示すように、従来手法4 < 発明手法1 < 発明手法4 < 発明手法5、となる。したがって、発明手法5は、高速な画像復元処理が可能である。

【0229】

図97は、比較対象手法との対比において原画像「カメラマン」に対する発明手法5のシミュレーション結果（視覚評価）を示す図であり、図98は、図97中の破線の円の周

辺領域を拡大した図である。また、図 99 は、比較対象手法との対比において原画像「レナ」に対する発明手法 5 のシミュレーション結果（視覚評価）を示す図であり、図 100 は、図 99 中の破線の円の周辺領域を拡大した図である。なお、シミュレーション条件は、図 46 に示す通りである。また、ここでの比較対象手法は、従来手法 3 と発明手法 1 である。

【0230】

図 97 ~ 図 100 に示すように、発明手法 5 は、従来手法 3 に比べて、明らかに原画像を忠実に復元していることがわかる。ただし、発明手法 1 と発明手法 5 を比較した場合、画像復元能力はほぼ同等のレベルである。

【0231】

図 101 は、比較対象手法との対比において原画像に対する発明手法 5 のシミュレーション結果（客観評価）を示す図である。

【0232】

この場合、図 101 に示すように、「カメラマン」、「レナ」どちらの画像についても、発明手法 5 は、発明手法 3 よりも P S N R の数値が小さく、従来手法 3 よりも P S N R の数値が大きいものの、発明手法 1、2、4 とは P S N R の数値がほぼ同レベルであることが確認できる。これにより、発明手法 5 は、客観評価の点でも、従来手法 3 に比べて画像復元能力が高いことがわかる。これにより、客観評価（数値による評価）の大小（良否）関係は、図 101 に示すように、従来手法 3 < 発明手法 1 < 発明手法 5 < 発明手法 2 < 発明手法 4 < 発明手法 3、となる。

【0233】

以上より、発明手法 5 は、2 次元に拡張した発明手法 4 とほぼ同等な画像復元能力を維持しつつ、演算量の軽減により高速で、かつ、処理効率が向上した画像復元手法を実現していることがわかる。

【0234】

< 発明手法 6 >

図 102 は、発明手法 5 の課題を視覚的に説明するための図である。

【0235】

発明手法 5 は、上記のように、発明手法 4 に対して、演算量を大幅に軽減して高速な画像復元処理を実現することができるものの、画像復元能力が若干低下している。これは、図 102 に示すように、発明手法 5 の観測方程式において、有色性駆動源の影響が大きい領域が含まれていないためであると考えられる。そこで、発明手法 6 では、注目画素領域のみでなく有色駆動源をも考慮した状態空間モデルを再構成する。すなわち、発明手法 6 では、有色性駆動源の影響を最大限に与えるように状態空間モデルを再構成する。

【0236】

図 103 は、発明手法 6 の観測方程式の構成を視覚的に示す説明図であり、図 104 は、発明手法 6 の状態空間モデルを視覚的に説明するための図である。なお、発明手法 6 の状態方程式は、発明手法 5（ひいては発明手法 4）の状態方程式と全く同じであるため、その説明を省略する。

【0237】

発明手法 6 では、図 103 に示すように、発明手法 4 の観測方程式において、注目画素領域に含まれる要素（例えば、画素領域ベクトル $y_5(n)$ ）に加えて、有色性駆動源の影響を受ける領域に含まれる要素（例えば、画素領域ベクトル $y_7(n)$ 、 $y_8(n)$ 、 $y_9(n)$ ）をも抽出して観測方程式を再構成する。すなわち、発明手法 6 では、有色性駆動源の影響を考慮するために、発明手法 5 と比較して、画素領域ベクトル $y_7(n)$ 、 $y_8(n)$ 、 $y_9(n)$ をも取り入れる。これにより、発明手法 6 では、発明手法 4 における観測ベクトル $y_{p4}(n)$ 、観測遷移行列 M_{p4} 、および観測雑音ベクトル $\varepsilon_{p4}(n)$ は、サイズがそれぞれ縮小されて、観測ベクトル $y_{p6}(n)$ 、観測遷移行列 M_{p6} 、観測雑音ベクトル $\varepsilon_{p6}(n)$ となる。このように、発明手法 6 では、図 104 に示すように、状態方程式における有色性駆動源の影響を最大限に考慮するべく、注目画素領域

10

20

30

40

50

と有色性駆動源の影響を受ける領域とから観測方程式を再構成する。これにより、発明手法 6 は、発明手法 5 の場合よりもサイズの縮小は小さいものの、発明手法 4 に対してサイズが縮小されるため、演算量は大幅に軽減される。

【0238】

図 105 は、発明手法 6 の状態方程式と観測方程式をまとめて示す説明図であり、図 106 は、発明手法 6 のアルゴリズムを説明するための図である。なお、式の表記法として、ここでは、一般に、アルファベットの小文字「 α_y 」は、サイズが $y \times 1$ のベクトルを表し、アルファベットの太文字「 B_y 」は、サイズが $y \times y$ の行列を表し、アルファベットの太文字「 $C_{(y \times z)}$ 」は、サイズが $y \times z$ の行列を表している。

【0239】

図 105 に示す状態方程式および観測方程式、ならびに図 106 に示すアルゴリズムにおいて、 K_6 は周辺画素領域（厳密には処理対象ブロック）に含まれる画素数であり、 m 、 n をそれぞれ周辺画素領域の縦軸と横軸の長さとした場合、 $K_6 = m \times n$ で表される。ここで、 m 、 n は、それぞれ、 $m = l_m \times p$ 、 $n = l_n \times q$ で表される。 p 、 q は、それぞれ、注目画素領域の縦軸と横軸の長さであり、 l_m 、 l_n は、それぞれ、 $p \times q$ と同等のサイズを周辺画素領域の縦軸と横軸に構成した数である。また、 L_6 は、注目画素領域と有色性駆動源を含む領域とを合わせた領域に含まれる画素数であり、 $L_6 = p \times q + m \times q$ で表される（ $L_6 < K_6$ ）。発明手法 6 のアルゴリズムは、図 106 に示すように、初期設定（Initialization）の過程と反復（Iteration）の過程とに大別され、反復過程は、発明手法 5 の場合（図 92 参照）よりも演算量が若干増加するものの、発明手法 4 の場合（図 78 参照）よりも演算量が軽減されるよう、図 105 に示す新しい状態空間モデル（状態方程式と観測方程式）を基に構成されている。反復過程では、1～6 の手順を逐次繰り返す。

【0240】

図 107 は、図 106 のアルゴリズムを実行する処理手順を示すフローチャートである。

【0241】

上記のように、発明手法 6 では、図 103 に示すように、発明手法 4 における観測ベクトル $y_{p4}(n)$ 、観測遷移行列 M_{p4} 、観測雑音ベクトル $\varepsilon_{p4}(n)$ は、サイズがそれぞれ縮小されて（つまり、 $L_6 < K_6$ ）、観測ベクトル $y_{p6}(n)$ 、観測遷移行列 M_{p6} 、観測雑音ベクトル $\varepsilon_{p6}(n)$ となっている。これにより、図 107 のフローチャートにおいて、 $n \rightarrow (n+1)$ の推定誤差の相関値（ $S7100$ ）は、サイズが $K_6 \times K_6$ の行列、重み係数（ $S7200$ ）は、サイズが $K_6 \times L_6$ の行列、 $n \rightarrow (n+1)$ の状態量の最適推定値（ $S7300$ ）は、サイズが $K_6 \times 1$ のベクトル、 $(n+1) \rightarrow (n+1)$ の状態量の最適推定値（ $S7400$ ）は、サイズが $K_6 \times 1$ のベクトル、 $(n+1) \rightarrow (n+1)$ の推定誤差の相関値（ $S7600$ ）は、サイズが $K_6 \times K_6$ の行列となる。

【0242】

図 108 は、発明手法 6 の演算量評価を説明するための図である。

【0243】

図 108 の上側に、発明手法 6 に対する、 256×256 サイズの 1 枚の画像を復元するのに必要な演算量（乗算回数）を示す。これに基づき、更新 1 回当たりの演算量（乗算回数）を求め、得られた結果を図 95 に示す棒グラフに加えると、図 108 の中央左側に示す棒グラフが得られる。この棒グラフから明らかなように、発明手法 6 は、発明手法 5 よりも演算量は若干多いものの、発明手法 4 よりも演算量は大幅に少ない。演算量の減少効果で見た場合、その大小関係は、従来手法 4 < 発明手法 4 < 発明手法 1 < 発明手法 6 < 発明手法 5、となる。したがって、発明手法 6 は、良好な演算量軽減を実現している。

【0244】

図 109 は、発明手法 6 の復元処理速度評価を説明するための図である。

【0245】

ここでは、図 96 の結果に、発明手法 6 の測定結果を追加した。その結果、発明手法 6

10

20

30

40

50

も、従来手法 4 と比較して、AR 係数推定（導出）の演算量が不要であるため、処理速度が速くなっている。また、発明手法 6 は、上記のように発明手法 4 よりも演算量が大幅に少ないため、発明手法 4 よりも高速な処理が可能となっている。発明手法 6 は、発明手法 5 よりも処理速度が若干遅い程度である。処理速度で見た場合、その大小関係は、図 1 0 9 に示すように、従来手法 4 < 発明手法 1 < 発明手法 4 < 発明手法 6 < 発明手法 5、となる。したがって、発明手法 6 も、高速な画像復元処理が可能である。

【0246】

図 1 1 0 は、比較対象手法との対比において原画像「カメラマン」に対する発明手法 6 のシミュレーション結果（視覚評価）を示す図であり、図 1 1 1 は、図 1 1 0 中の破線の円の周辺領域を拡大した図である。また、図 1 1 2 は、比較対象手法との対比において原画像「レナ」に対する発明手法 6 のシミュレーション結果（視覚評価）を示す図であり、図 1 1 3 は、図 1 1 2 中の破線の円の周辺領域を拡大した図である。なお、シミュレーション条件は、図 4 6 に示す通りである。また、ここでの比較対象手法は、従来手法 3 と発明手法 1 である。

10

【0247】

図 1 1 0 ~ 図 1 1 3 に示すように、発明手法 6 は、従来手法 3 に比べて、明らかに原画像を忠実に復元していることがわかる。しかも、発明手法 1 と比較しても、画像復元能力は、発明手法 6 のほうが高いことがわかる。

【0248】

図 1 1 4 は、比較対象手法との対比において原画像に対する発明手法 6 のシミュレーション結果（客観評価）を示す図である。

20

【0249】

この場合、図 1 1 4 に示すように、「カメラマン」、「レナ」どちらの画像についても、発明手法 6 は、他のどの手法（従来手法 3 はもとより発明手法 1 ~ 5）よりも PSNR の数値が大きいことが確認できる。これにより、発明手法 6 は、客観評価の点でも、他の手法（従来手法 3、発明手法 1 ~ 5）に比べて画像復元能力が高いことがわかる。これにより、客観評価（数値による評価）の大小（良否）関係は、図 1 1 4 に示すように、従来手法 3 < 発明手法 1 < 発明手法 5 < 発明手法 2 < 発明手法 4 < 発明手法 3 < 発明手法 6、となる。

【0250】

30

以上より、発明手法 6 は、発明手法 5 よりも演算量を若干増加させつつも、発明手法 1 ~ 5 よりも高い良好な画像復元能力を発揮することができる高速な画像復元処理を実現していることがわかる。

【0251】

ここで、発明手法 1 ~ 6 の状態空間モデル（状態方程式と観測方程式）の特徴についてまとめておく。

【0252】

< 発明手法 1 >

状態方程式は、時刻 $n + 1$ の K_1 個の原画像（画素情報）が、時刻 n の K_1 個の原画像（画素情報）と、 m 個の原画像（画素情報）を含む有色性駆動源とから構成されている。また、観測方程式は、時刻 n の K_1 個の原画像（画素情報）が、ぼけと雑音の影響を受けて K_1 個の劣化画像（画素情報）から構成されている。このような状態空間モデルにより、発明手法 1 では、観測方程式の K_1 個の劣化画像（画素情報）を用いて、状態方程式の時刻 $n + 1$ における K_1 個の原画像（画素情報）を予測している。

40

【0253】

< 発明手法 2 >

発明手法 1 において、必要な復元画像（画素情報）は 1 個である。それゆえ、発明手法 2 では、演算量を軽減するために、発明手法 1 の観測方程式の 1 個の劣化画像（画素情報）のみに着目して、発明手法 1 の観測方程式を再構成する。ただし、発明手法 2 の状態方程式は、発明手法 1 と同じである。このような状態空間モデルにより、発明手法 2 の観測

50

方程式では、時刻 n の 1 個の劣化画像（画素情報）のみを用いるため、過去の劣化画像（画素情報）に依存することなく、最も少ない演算量で 1 個の原画像（画素情報）を予測している。

【0254】

< 発明手法 3 >

少ない演算量で高性能な画像復元能力を得るために、発明手法 3 の観測方程式は、有色性駆動源の影響を含む時刻 n の原画像（画素情報）からなる発明手法 1 の観測方程式の一部と、発明手法 2 の観測方程式とから構成されている。このような状態空間モデルにより、発明手法 3 では、有色性駆動源の影響を最大限に考慮しているため、演算量の軽減を図りながら高性能な画像復元を実現している。

10

【0255】

< 発明手法 4 >

処理効率を向上させるために、2次元に拡張した状態方程式は、時刻 $n + 1$ の K_4 個の原画像（画素情報）が、時刻 n の K_4 個の原画像（画素情報）と、 $m \times q$ 個の原画像（画素情報）を含む有色性駆動源とから構成されている。また、2次元に拡張した観測方程式は、時刻 n の K_4 個の原画像（画素情報）が、ぼけと雑音の影響を受けて K_4 個の劣化画像（画素情報）から構成されている。このような状態空間モデルにより、発明手法 4 では、観測方程式の K_4 個の劣化画像（画素情報）を用いて、状態方程式の時刻 $n + 1$ における K_4 個の原画像（画素情報）を予測している。

20

【0256】

< 発明手法 5 >

2次元に拡張した発明手法 4 において、必要な復元画像（画素情報）は $p \times q$ 個である。それゆえ、発明手法 2 では、演算量を軽減するために、発明手法 4 の観測方程式の $p \times q$ 個の劣化画像（画素情報）のみに着目して、発明手法 4 の観測方程式を再構成する。ただし、発明手法 5 の状態方程式は、発明手法 4 と同じである。このような状態空間モデルにより、発明手法 5 の観測方程式では、時刻 n の $p \times q$ 個の劣化画像（画素情報）のみを用いるため、過去の劣化画像（画素情報）に依存することなく、最も少ない演算量で $p \times q$ 個の原画像（画素情報）を予測している。

【0257】

< 発明手法 6 >

少ない演算量で高性能な画像復元能力を得るために、発明手法 6 の観測方程式は、有色性駆動源の影響を含む時刻 n の原画像（画素情報）からなる発明手法 4 の観測方程式の一部と、発明手法 5 の観測方程式とから構成されている。このような状態空間モデルにより、発明手法 6 では、有色性駆動源の影響を最大限に考慮しているため、演算量を軽減しながら高性能な画像復元を実現している。

30

【0258】

このように、発明手法 1 ~ 6 によれば、いずれも、AR 係数を必要としない新しい状態空間モデル（状態方程式と観測方程式）を構成して 1 段階処理の新しい予測法によって画像復元を行うため、1 枚の劣化画像のみを用いてぼけと雑音を同時に取り除くことができる。

40

【0259】

また、発明手法 1 ~ 6 によれば、いずれも、AR 係数を必要としないため、演算量を軽減することができる。

【0260】

また、発明手法 1 ~ 3 を 2次元に拡張した発明手法 4 ~ 6 によれば、注目画素領域および周辺画素領域のサイズをそれぞれ任意に変化させることができるため、例えば、劣化画像の性質によって 1次元および 2次元の新しい予測法に基づく画像復元手法を使い分けることが可能となり、効率のよい画像復元を実現することができる。

【0261】

特に、発明手法 4 ~ 6 は、2次元に拡張された新しい予測法を用いた劣化画像復元手法

50

である。この発明手法 4 ～ 6 の最大の特徴は、劣化画像の性質やユーザの目的などに応じて、発明手法 1、発明手法 1 の演算量を軽減した発明手法 2、および性能を優先させた発明手法 3 を実現可能となるだけでなく、2 次元に拡張した発明手法 4、発明手法 4 の演算量を軽減した発明手法 5、および性能を優先させた発明手法 6 と適応的に変更できることである。

【 0 2 6 2 】

(実施の形態 2)

実施の形態 2 は、状況に応じて複数の画像復元手法を適応的に切り替えて実行させる場合である。

【 0 2 6 3 】

図 1 1 5 は、本発明の実施の形態 2 に係る画像復元装置の構成を示すブロック図である。なお、この画像復元装置 2 0 0 は、図 1 に示す画像復元装置 1 0 0 と同様の基本的構成を有しており、同一の構成要素にば同一の符号を付し、その説明を省略する。

【 0 2 6 4 】

図 1 1 5 に示す画像復元装置 2 0 0 は、複数の画像復元アルゴリズムを内蔵しており、ユーザの選択によって、または、状況に応じて自動的に、内蔵した画像復元アルゴリズムを切り替えて実行可能である。複数の画像復元アルゴリズムとしては、例えば、上記した発明手法 1 ～ 6 の全部または一部を用いることができる。発明手法 1 ～ 6 は、上記のように、復元能力や処理速度（演算量）、処理効率、柔軟性などの点で、それぞれ特徴を有するため、適用する発明手法を状況に応じて適宜選択することによって、状況に応じた最適な画像復元を行うことができる。なお、内蔵する複数の画像復元アルゴリズムは、発明手法 1 ～ 6 に限定されるわけではなく、発明手法 1 ～ 6 と従来手法（例えば、上記の従来手法 1 ～ 4）との任意の組み合わせであってもよい。

【 0 2 6 5 】

このような機能を実現するため、画像復元装置 2 0 0 は、復元モード指定部 2 1 0 と画像復元処理部 2 2 0 を有する。復元モード指定部 2 1 0 は、例えば、操作部 1 3 0 に設けられている。復元モード指定部 2 1 0 は、使用者の入力操作により、後述する復元モードを指定する。また、画像復元処理部 2 2 0 は、例えば、パラメータ設定部 2 2 2、被写体領域判定部 2 2 4 を有する。また、記憶部 1 5 0 において、例えば、主記憶装置 1 5 2 は、取込画像メモリ 2 3 0、被写体領域メモリ 2 3 2、処理パラメータメモリ 2 3 4、および復元画像メモリ 2 3 6 を有し、表示メモリ 1 5 6 は、取込画像メモリ 2 4 0、処理内容メモリ 2 4 2、および復元画像メモリ 2 4 4 を有する。

【 0 2 6 6 】

図 1 1 6 は、復元モード指定部 2 1 0 によって指定可能な復元モードの具体例を示す図である。

【 0 2 6 7 】

復元モード指定部 2 1 0 によって指定可能な復元モードは、図 1 1 6 に示すように、復元モード指定部 2 1 0 の内部構造として与えられる。図 1 1 6 に示す例では、復元モードとして、まず大別して、例えば、「カメラモード」、「取込画像」、「品質」が設けられている。そして、カメラモードには、例えば、「スポーツ」や「風景」、「夜景」、「接写」、「ポートレート」などのモードが設けられ、取込画像には、例えば、「写真」や「文字」、「風景」などのモードが設けられている。また、品質には、「画質優先」や「オート」、「処理速度優先」などのモードが設けられている。画質優先のモードは、さらに、「非常に細かい」、「細かい」、「普通」の 3 段階に分かれている。それぞれの復元モードには、予め、最適な画像復元アルゴリズムが対応付けられている。例えば、「品質」の「処理速度優先」には、発明手法 5 が対応付けられ、「品質」の「非常に細かい」には、発明手法 3 または発明手法 6 が対応付けられている。また、復元モードは、異なる項目から複数同時に指定することもできる。例えば、「取込画像」から「写真」を指定し、「品質」から「画質優先」の「非常に細かい」を指定した場合には、これらの条件にマッチした復元処理を行う画像復元アルゴリズムが実行される。

【0268】

画像復元処理部220において、パラメータ設定部222は、操作部130のパラメータ設定部132によって入力された各種パラメータの値を内部的に設定する。また、被写体領域判定部224は、所定の被写体領域判定アルゴリズムによって、被写体の領域を判定する。ここでは、被写体領域判定アルゴリズムは、特に限定されず、周知の任意のアルゴリズムを用いることができる。

【0269】

また、主記憶装置152において、取込画像メモリ230は、画像入力装置110によって取り込まれた画像を格納し、被写体領域メモリ232は、被写体領域判定部224によって判定された被写体の領域を格納する。被写体領域メモリ232に格納される被写体領域は、被写体の画像そのものでも被写体の画像の格納場所でもよい。処理パラメータメモリ234は、操作部130によって設定された復元処理の内容（設定されたパラメータや復元モードなど）を格納する。復元画像メモリ234は、画像復元処理部220によって復元された画像を格納する。また、表示メモリ156において、取込画像メモリ240は、主記憶装置152の取込画像メモリ230に格納された取込画像のうち、表示する取込画像を一時格納し、処理内容メモリ242は、処理パラメータメモリ234に格納された復元処理の内容（設定されたパラメータや復元モードなど）のうち、表示する処理内容を一時格納する。復元画像メモリ244は、主記憶装置152の復元画像メモリ234に格納された復元画像のうち、表示する復元画像を一時格納する。

【0270】

次いで、上記構成を有する画像復元装置200の動作について、図117に示すフローチャートを用いて説明する。なお、図117に示すフローチャートは、記憶部150（主記憶装置152または補助記憶装置154）に制御プログラムとして格納されており、図示しないCPUによって実行される。

【0271】

まず、ステップS8000では、画像入力装置110から復元処理対象の画像データ（劣化画像）を取り込み、主記憶装置152の取込画像メモリ230に格納する。

【0272】

そして、ステップS8050では、ステップS8000で取り込んだ画像データを、少なくとも1フレーム、一時的に記憶する。ここでは、取り込んだ画像データ（少なくとも1フレーム）を、1フレーム以上の画像データを一時的に蓄積するメモリ（例えば、主記憶装置152の図示しない作業用メモリ）に記憶する。

【0273】

そして、ステップS8100では、画像復元処理部220の被写体領域判定部224で、ステップS8050で一時的に記憶した取込画像データに対して、所定のレベルでプレスキャン（被写体認識）する。具体的には、取込画像データ中で所定レベル以上の変化点抽出する。

【0274】

そして、ステップS8150では、ステップS8100の結果を用いて、所定レベル以上の変化点を抽出した位置を、取込画像データに対応付けて、主記憶装置152の被写体領域メモリ232に記憶する。

【0275】

そして、ステップS8200では、プレスキャンを終了するか否かを判断する。この判断は、プレスキャンを行っていないフレームが存在するか否かに基づいて行われる。すなわち、複数のフレームが存在する場合には、フレームの数だけプレスキャンを繰り返すことになる。この判断の結果として、プレスキャンを終了する場合は（S8200：YES）、ステップS8250に進み、プレスキャンを終了しない場合は（S8200：NO）、ステップS8100に戻る。

【0276】

ステップS8250では、操作部130の復元モード指定部210および領域指定部1

10

20

30

40

50

34で、復元モードの設定と境界領域の設定を行う。設定可能な復元モードは、例えば、上記した図116に示す通りである。また、境界領域の設定では、ステップS8100でプレスキャンしたときの境界領域の確認を行う。

【0277】

そして、ステップS8300では、被写体領域か否かの判断を行う。具体的には、処理対象ブロック（注目画素とその周辺画素）が被写体領域を含んでいるか否かを判断する。この判断は、例えば、プレスキャンした段階で、劣化画像の中のどの位置にユーザが注目している被写体があるのかを画素の輝度値により自動的に判定しておき、この結果を利用したり、あるいは、ユーザにタッチパネルを使って選択的に被写体領域を判定させたりすることによって行われる。この判断の結果として、処理対象ブロックが被写体領域を含む場合は（S8300：YES）、ステップS8350に進み、処理対象ブロックが被写体領域を含まない場合は（S8300：NO）、ステップS8400に進む。

10

【0278】

ステップS8350では、実行する画像復元手法として、ステップS8250で設定した復元モードに対応する1次元の画像復元手法（例えば、発明手法1～3のいずれか）を選択する。また、ステップS8400では、実行する画像復元手法として、ステップS8250で設定した復元モードに対応する2次元の画像復元手法（例えば、発明手法4～6のいずれか）を選択する。すなわち、本実施の形態では、処理対象ブロックが被写体領域を含むか否かで大きく1次元復元手法を実行するか2次元復元手法を実行するかを選択し、その後、選択された1次元復元手法または2次元復元手法の中から、例えば、取込画像（写真や文字など）、品質（画質やスピードなど）、または様々な用途（ポートレートや夜景など）に適応した復元モードに応じて、最適な復元手法を選択するようにしている。

20

【0279】

そして、ステップS8450では、画像復元処理部220で、ステップS8350またはステップS8400で選択した画像復元手法を用いて、設定されたパラメータに従った画像復元処理を行う。ここで、パラメータの設定は、操作部130のパラメータ設定部132で行われる。

【0280】

そして、ステップS8500では、当該フレームについて画像復元処理が終了したか否かを判断する。この判断の結果として、当該フレームについて画像復元処理が終了した場合は（S8500：YES）、ステップS8550に進み、当該フレームについて画像復元処理が終了していない場合は（S8500：NO）、ステップS8300に戻る。

30

【0281】

ステップS8550では、全フレームについて画像復元処理が終了したか否かを判断する。この判断の結果として、全フレームについて画像復元処理が終了していない場合は（S8550：NO）、ステップS8250に戻り、全フレームについて画像復元処理が終了した場合は（S8550：YES）、上記一連の処理を終了する。したがって、複数のフレームが存在する場合には、フレームの数だけ画像復元処理を繰り返すことになる。

【0282】

このように、本実施の形態によれば、状況に応じて複数の画像復元手法を適応的に切り替えて実行させるため、復元する画素に適した画像復元処理を、1チップで、高精度かつ高速に行うことができる。

40

【産業上の利用可能性】

【0283】

本発明に係る画像復元装置および画像復元方法は、画像復元能力を向上することができるシンプルで実用的な画像復元装置および画像復元方法として有用である。

【符号の説明】

【0284】

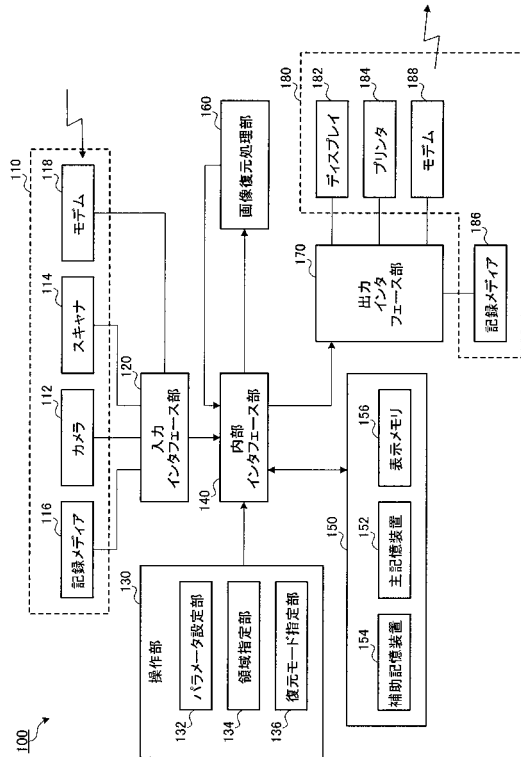
100、200 画像復元装置

110 画像入力装置

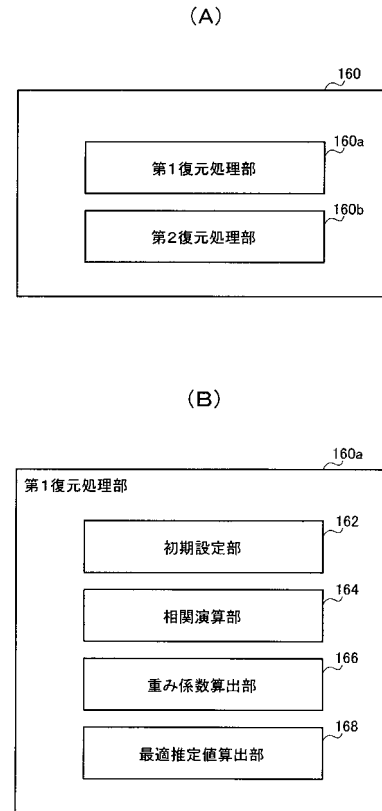
50

1 1 2	カメラ	
1 1 4	スキャナ	
1 1 6、1 8 6	記録メディア	
1 1 8、1 8 8	モデム	
1 2 0	入力インタフェース部	
1 3 0	操作部	
1 3 2、2 2 2	パラメータ設定部	
1 3 4	領域指定部	
1 3 6、2 1 0	復元モード指定部	
1 4 0	内部インタフェース部	10
1 5 0	記憶部	
1 5 2	主記憶装置	
1 5 4	補助記憶装置	
1 5 6	表示メモリ	
1 6 0、2 2 0	画像復元処理部	
1 6 0 a	第 1 復元処理部	
1 6 0 b	第 2 復元処理部	
1 6 2	初期設定部	
1 6 4	相関演算部	
1 6 6	重み係数算出部	20
1 6 8	最適推定値算出部	
1 7 0	出力インタフェース部	
1 8 0	画像出力装置	
1 8 2	ディスプレイ	
1 8 4	プリンタ	
2 2 4	被写体領域判定部	
2 3 0、2 4 0	取込画像メモリ	
2 3 2	被写体領域メモリ	
2 3 4	処理パラメータメモリ	
2 3 6、2 4 4	復元画像メモリ	30
2 4 2	処理内容メモリ	

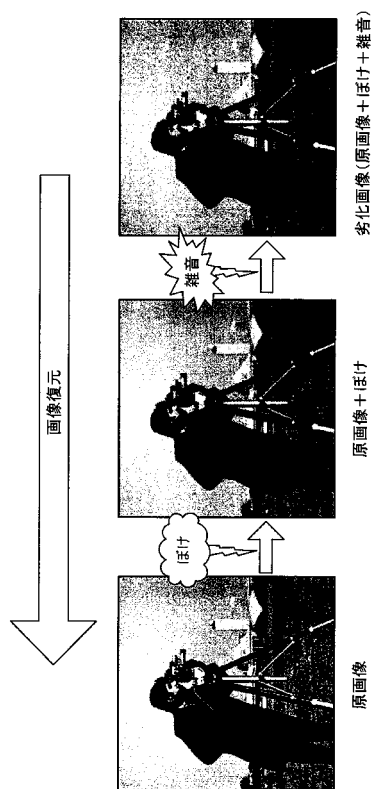
【図 1】



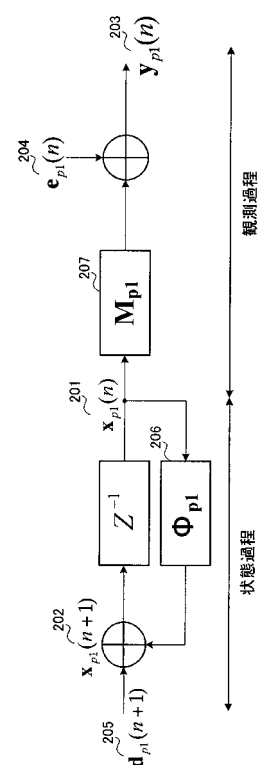
【図 2】



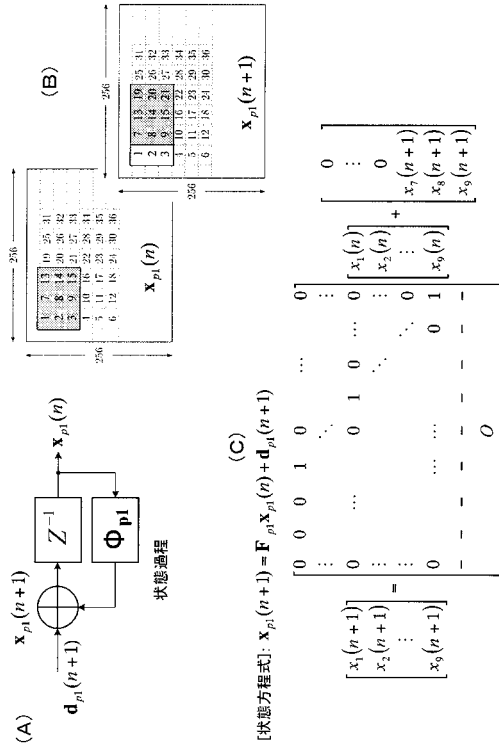
【図 3】



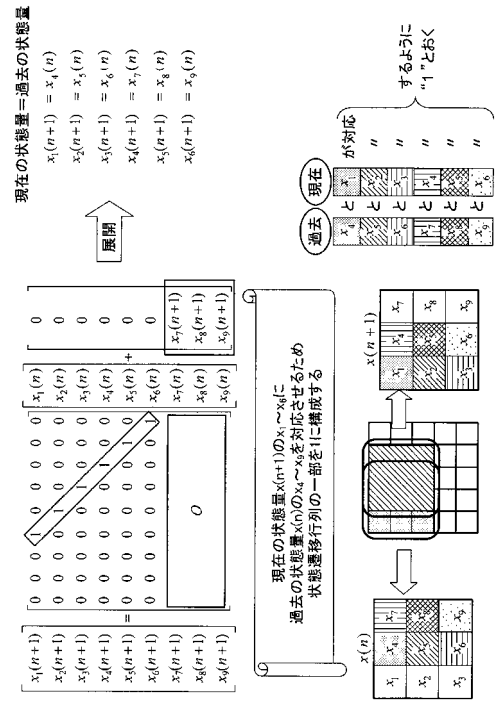
【図 4】



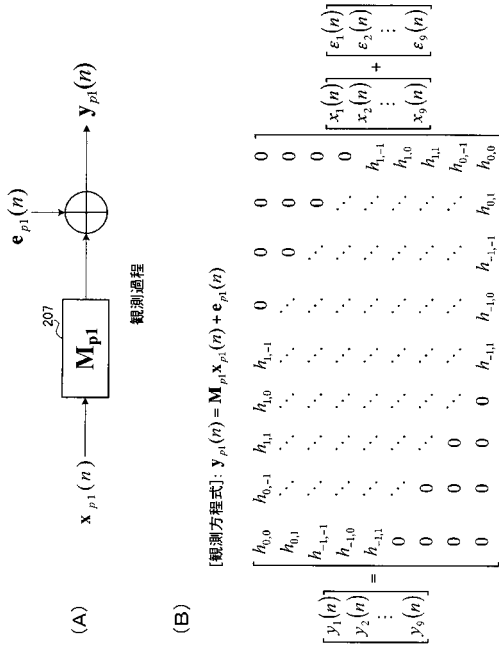
【図 5】



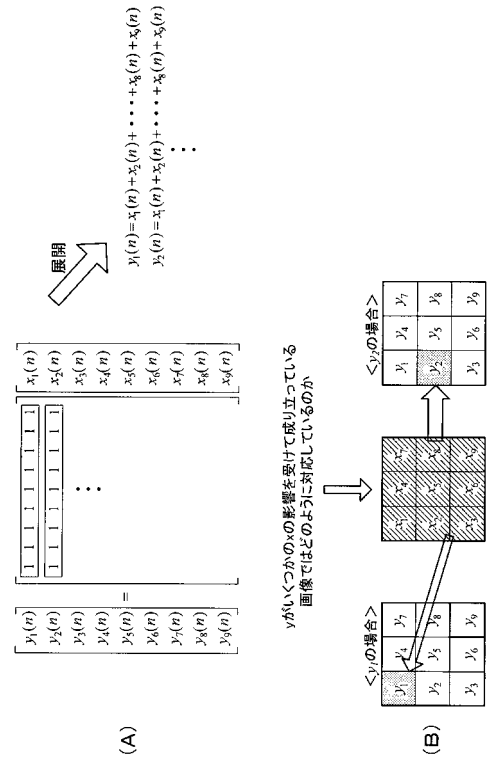
【図 6】



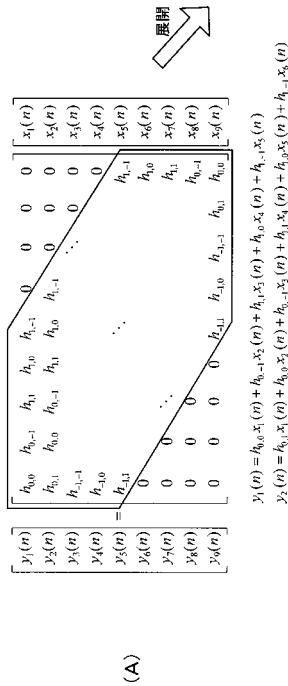
【図 7】



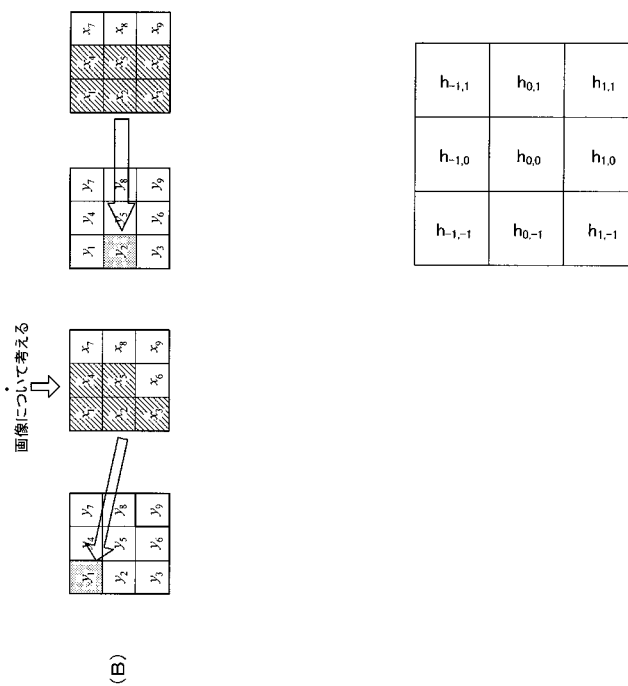
【図 8】



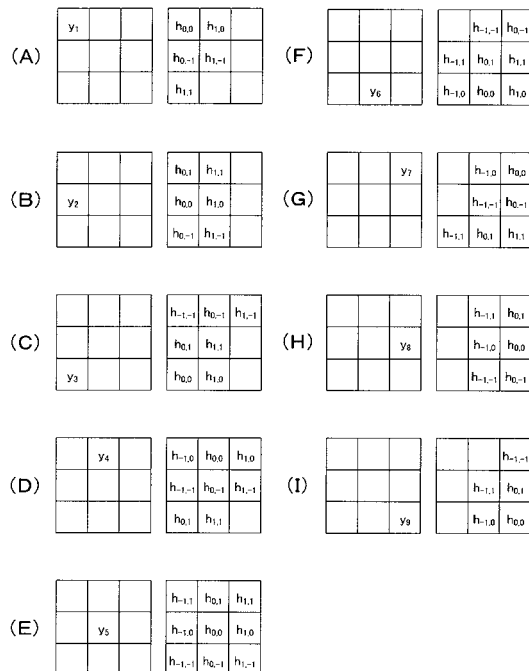
【図 9】



【図 10】



【図 11】



【図 12】

[状態方程式]

$$x_{p1}(n+1) = F_{p1}x_{p1}(n) + d_{p1}(n+1)$$
 [観測方程式]

$$y_{p1}(n) = M_{p1}x_{p1}(n) + e_{p1}(n)$$

[Initialization]

$$\hat{x}_{p1}(0|0) = 0_K$$

$$P_{p1}(0|0) = I_K$$

$$R_{p1}(n)[i,j] = \begin{cases} \frac{1}{K} \sum_{l=1}^K [\hat{x}_{p1}^T(n-l|l) \hat{x}_{p1}(n-l|l)] & (i=j, \quad i, j > K^2 - K) \\ 0 & (i=j, \quad i, j \leq K^2 - K) \\ 0 & (other) \end{cases}$$

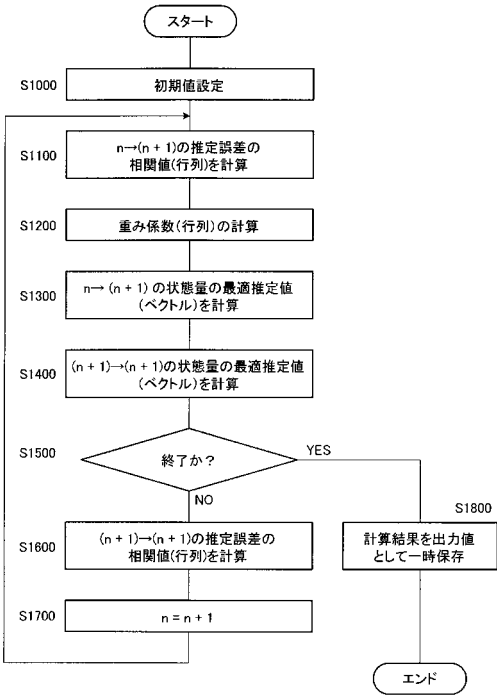
$$R_{p1}[i,j] = E[\epsilon_{p1}(n)\epsilon_{p1}^T(n)][i,j] = \begin{cases} \sigma_e^2 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

[Iteration]

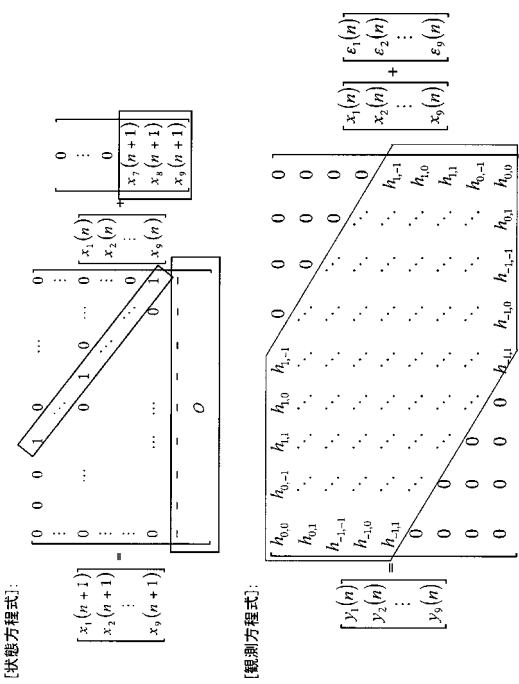
for n = 0

1. $P_{p1}(n+1|n) = \Phi_{p1}P_{p1}(n|n)\Phi_{p1}^T + R_{p1}(n+1)$
2. $K_{p1}(n+1) = \{P_{p1}(n+1|n)M_{p1}^T\} \{M_{p1}P_{p1}(n+1|n)M_{p1}^T + R_{p1}(n+1)\}^{-1}$
3. $\hat{x}_{p1}(n+1|n) = \Phi_{p1}\hat{x}_{p1}(n|n)$
4. $\hat{x}_{p1}(n+1|n+1) = \hat{x}_{p1}(n+1|n) + K_{p1}(n+1)\{y_{p1}(n+1) - M_{p1}\hat{x}_{p1}(n+1|n)\}$
5. $P_{p1}(n+1|n+1) = \{I - K_{p1}(n+1)M_{p1}^T\}P_{p1}(n+1|n)$
6. $n = n+1$ go back 1.

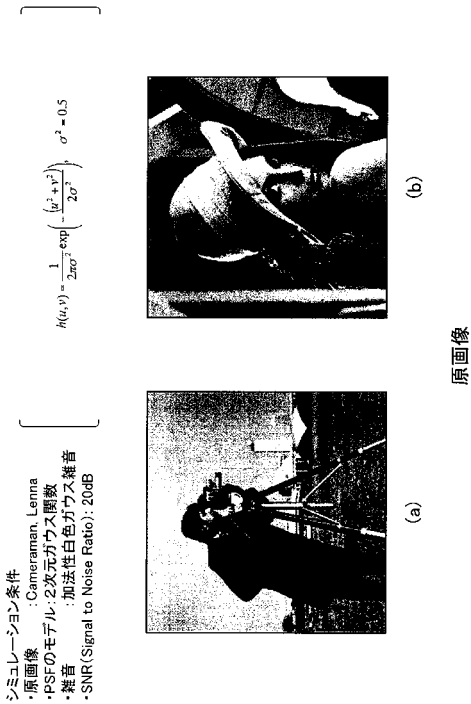
【図 1 3】



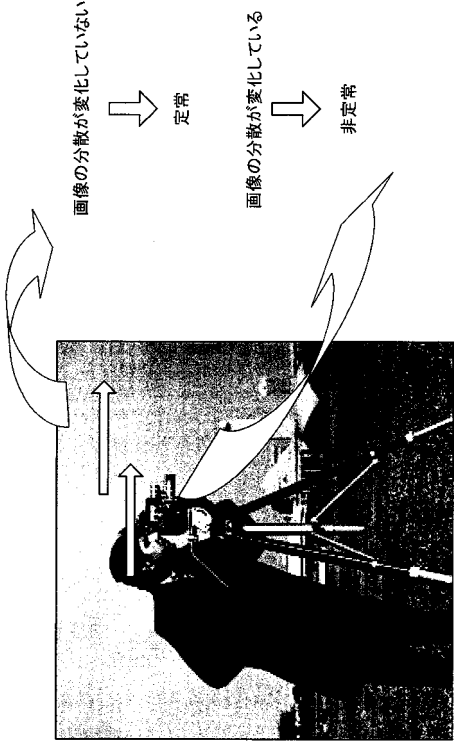
【図 1 4】



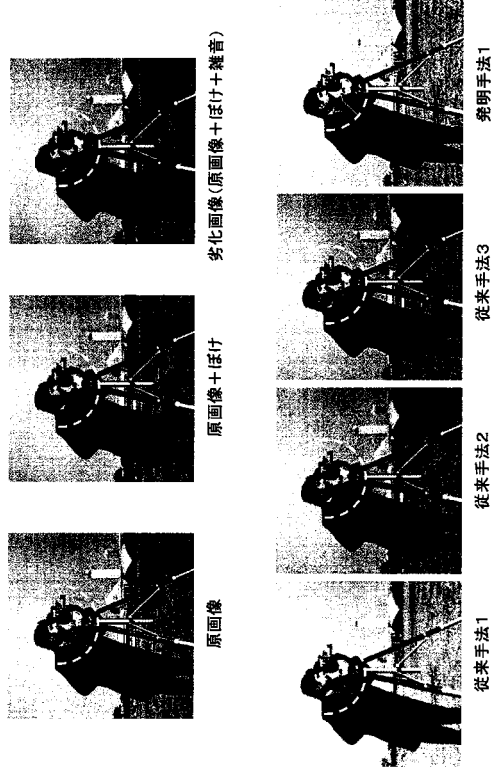
【図 1 5】



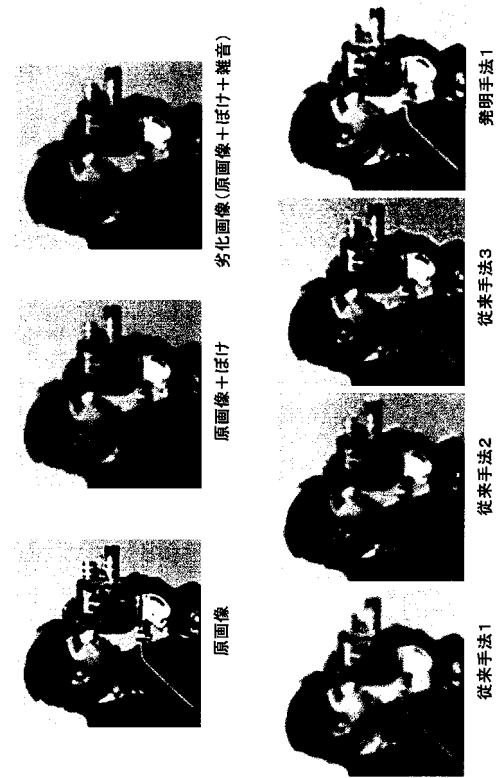
【図 1 6】



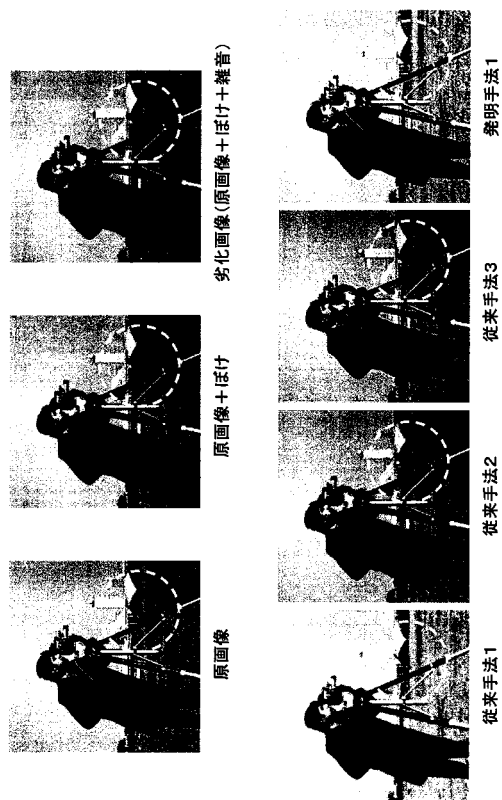
【図 17】



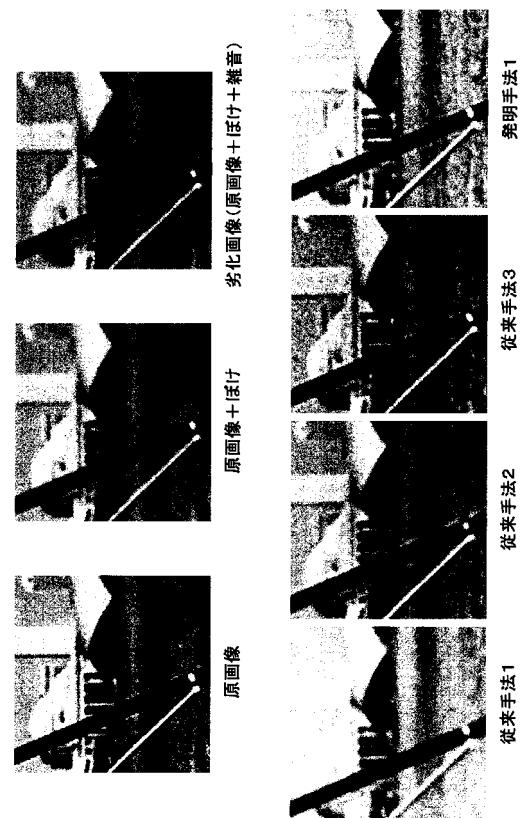
【図 18】



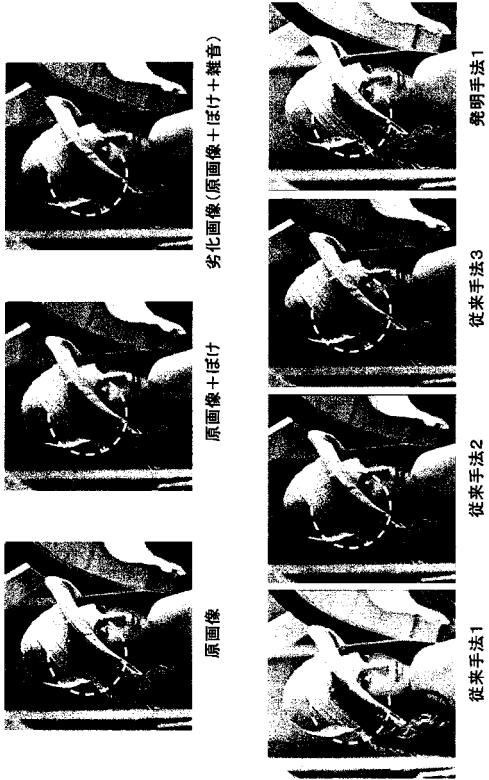
【図 19】



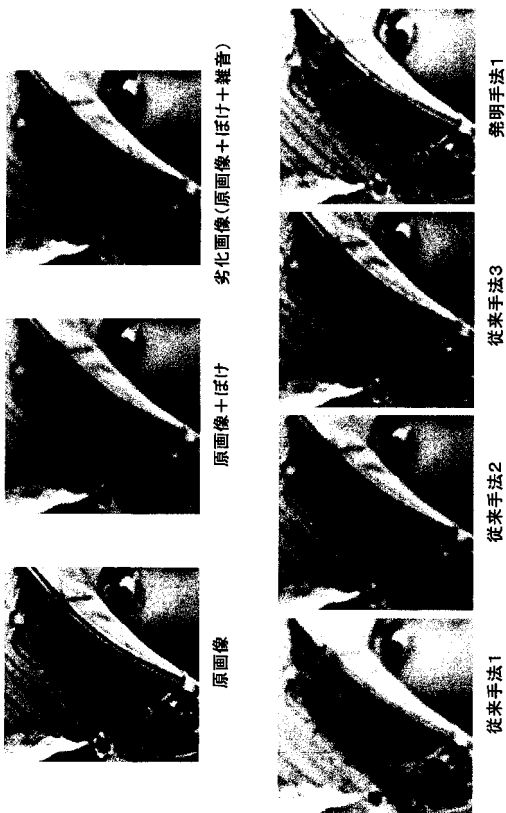
【図 20】



【図 2 1】



【図 2 2】



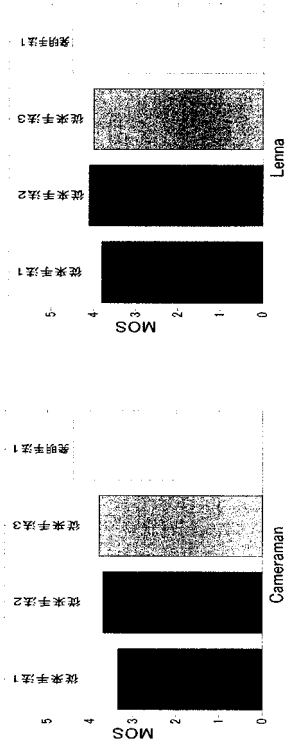
【図 2 3】

原画像と復元画像の SNR_{out}

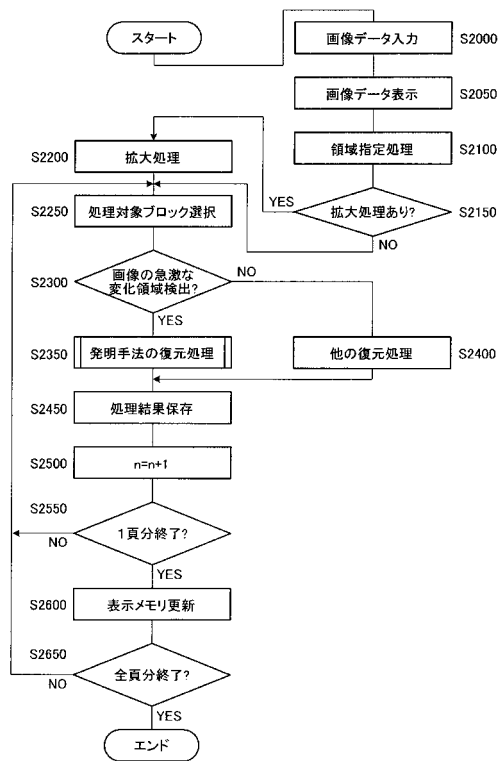
$$SNR_{out} = 20 \log_{10} \frac{\sum_{x=1}^{256} \sum_{y=1}^{256} \{f(x,y)\}^2}{\sum_{x=1}^{256} \sum_{y=1}^{256} \{f(x,y) - \hat{f}(x,y)\}^2} \quad [dB]$$

シミュレーション結果に基づく評価				
	[dB]			
	従来手法1	従来手法2	従来手法3	発明手法1
Cameraman	24.8	26.9	25.5	27.7
Lenna	25.8	27.8	27.4	30.0

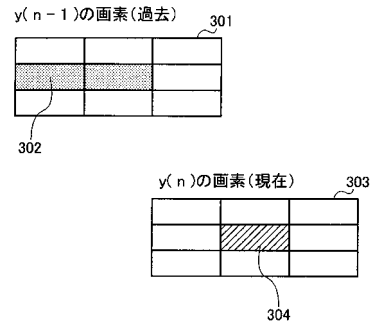
【図 2 4】



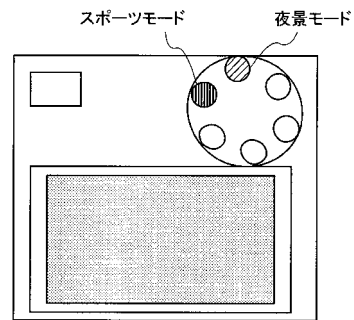
【図 25】



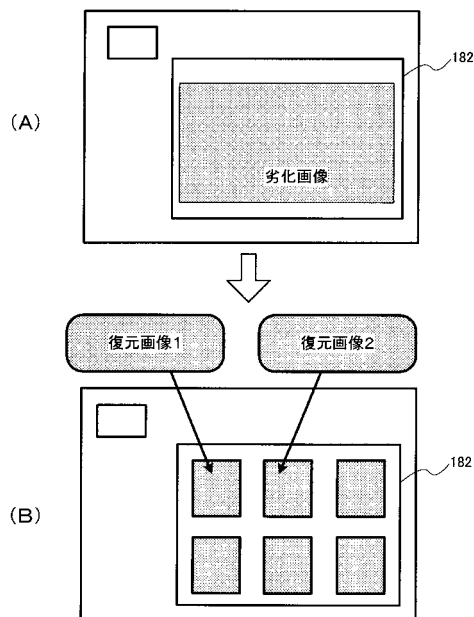
【図 26】



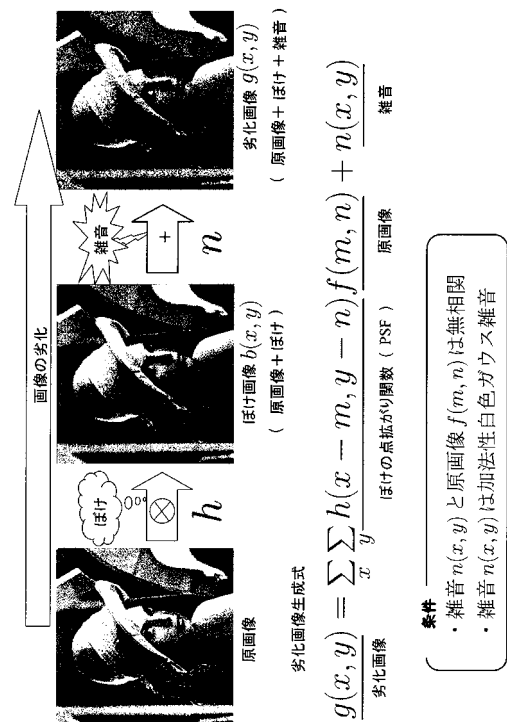
【図 27】



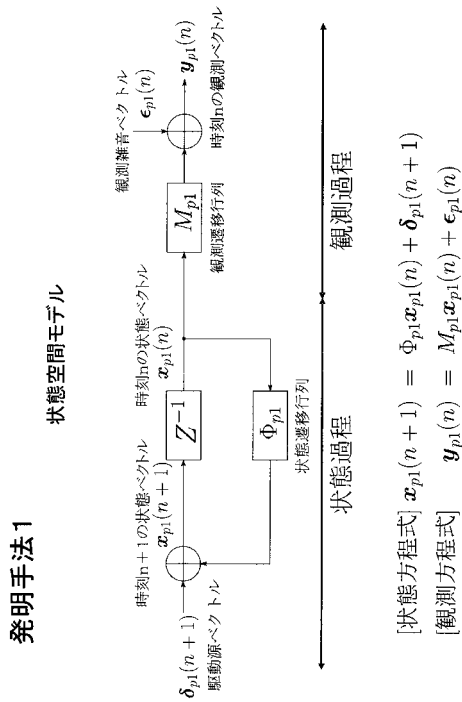
【図 28】



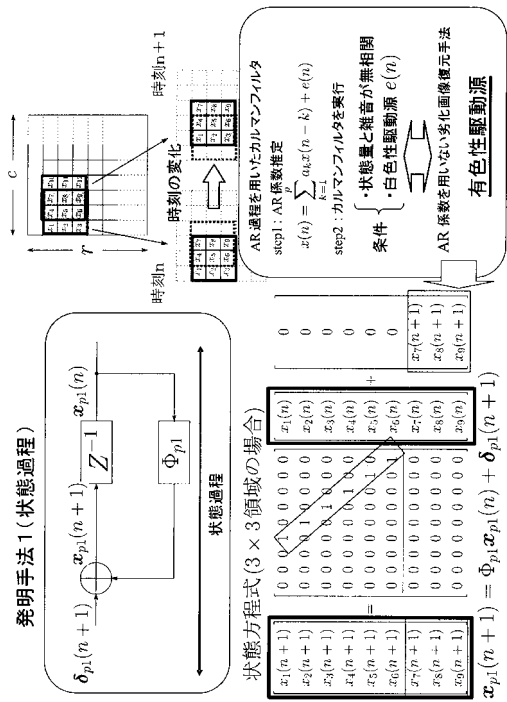
【図 29】



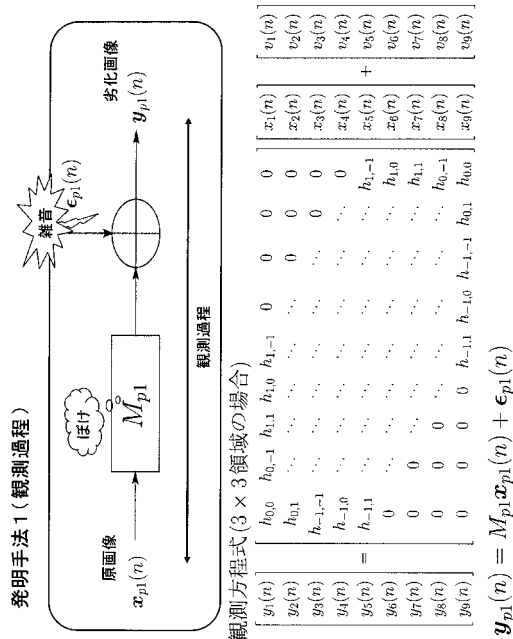
【図 30】



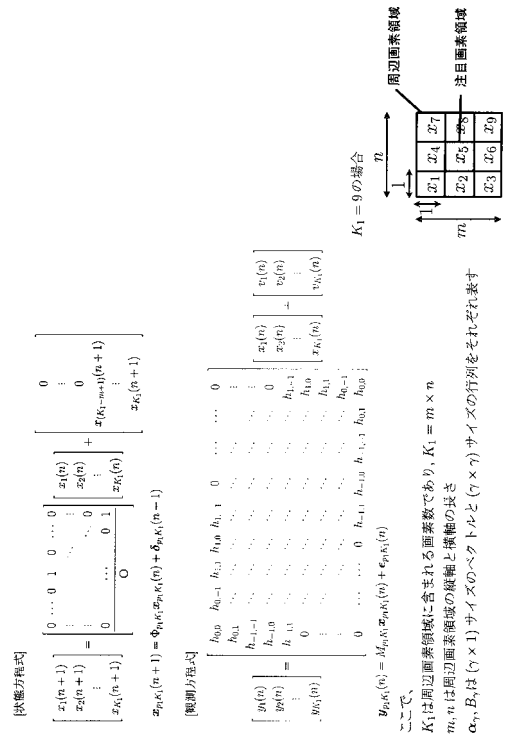
【図 31】



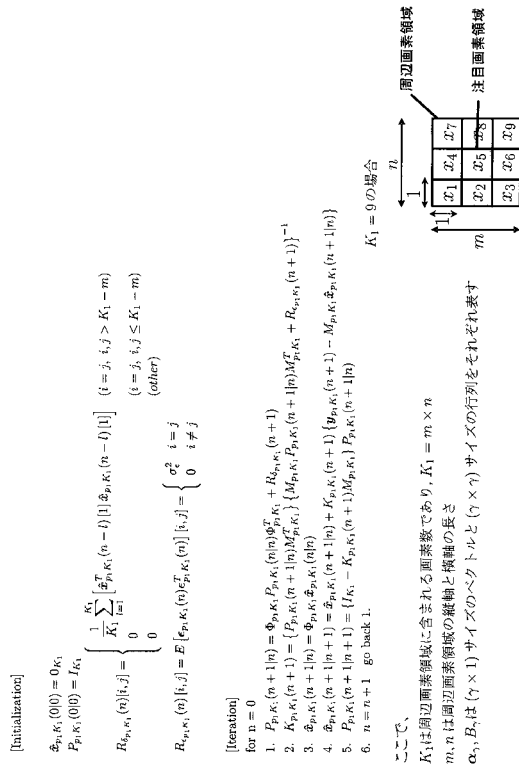
【図 32】



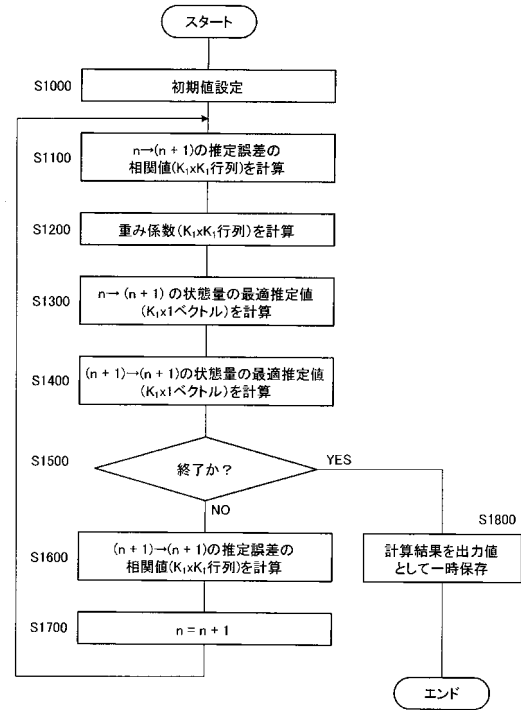
【図 33】



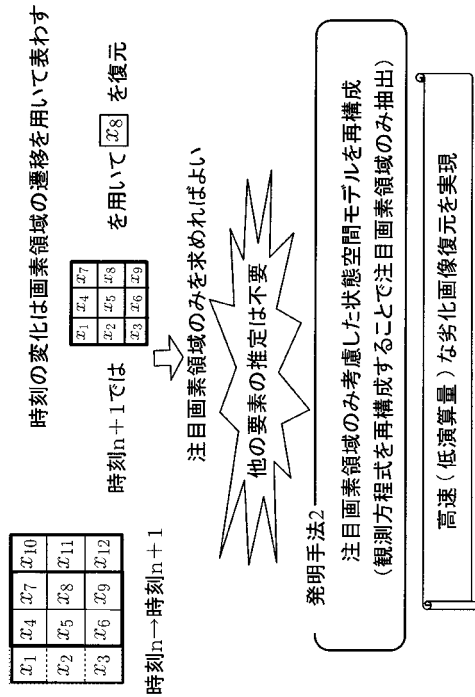
【図 3 4】



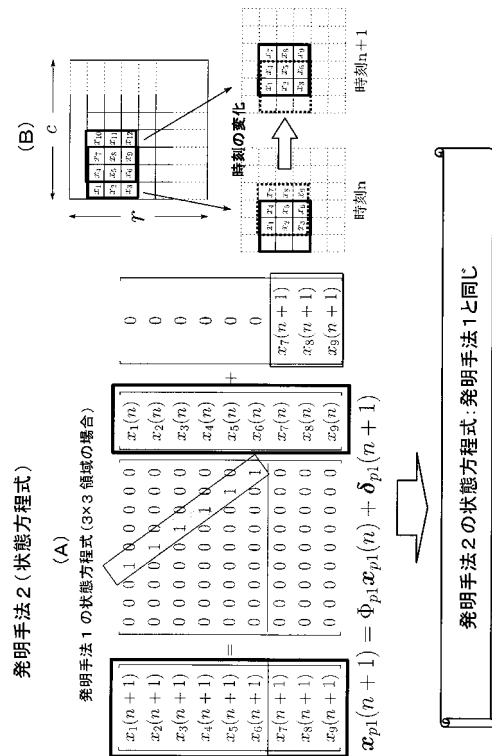
【図 3 5】



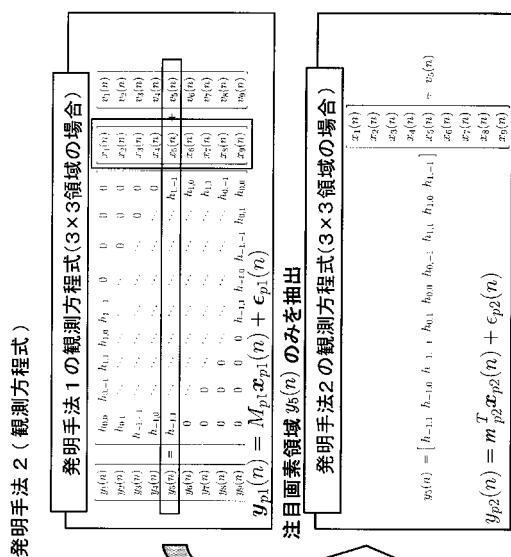
【図 3 6】



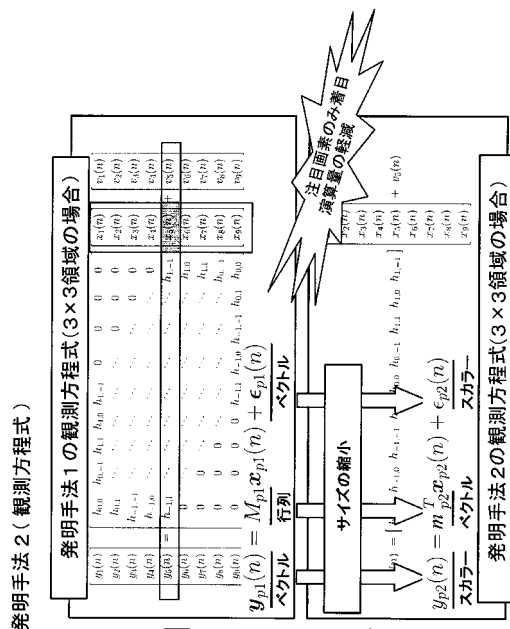
【図 3 7】



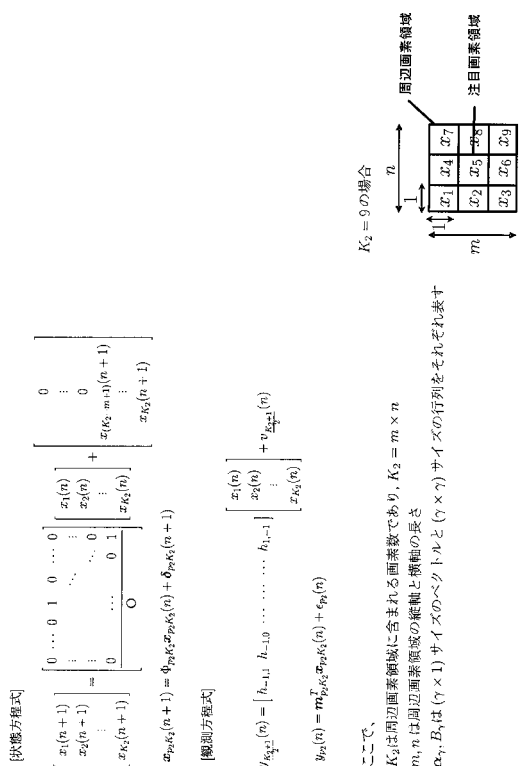
【 ㄨ 3 8 】



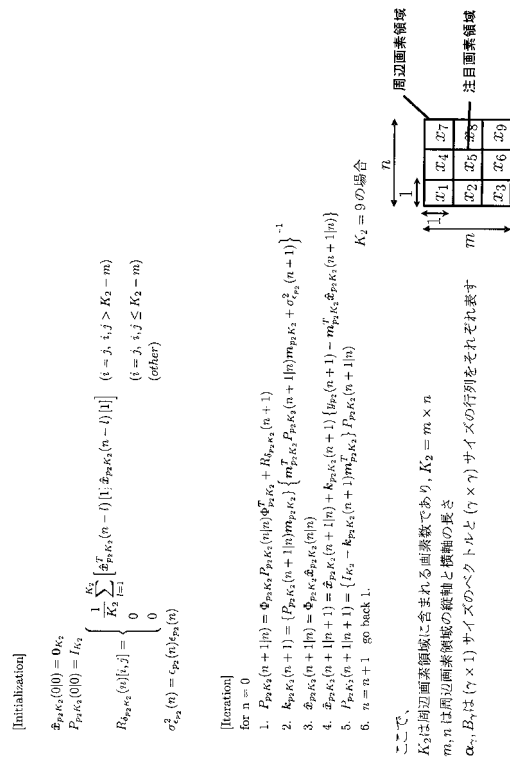
【 ㊦ 3 9 】



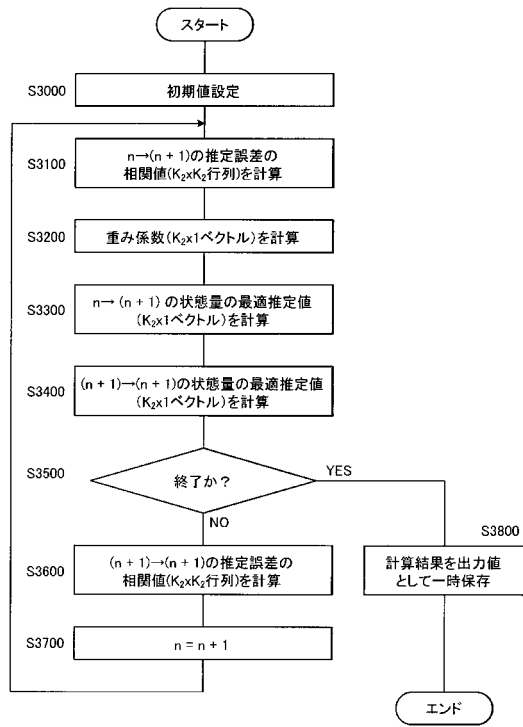
【 図 4 0 】



【 図 4 1 】



【図 4 2】



【図 4 3】

アルゴリズムの比較

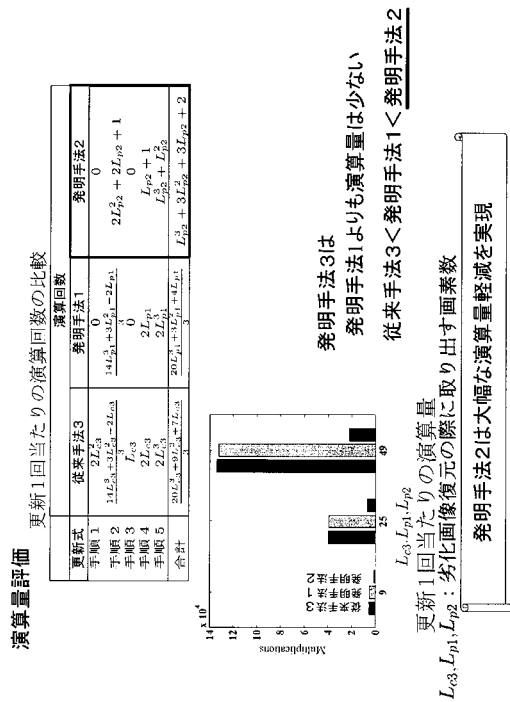
発明手法 1

[Iteration]
for $n = 0$
1. $P_{n+1}(n+1) = \Phi_{n+1} P_{n+1}(n) \Phi_{n+1}^T + R_{n+1}(n+1)$
2. $K_{n+1}(n+1) = [P_{n+1}(n+1) \Phi_{n+1}^T] [P_{n+1}(n+1) \Phi_{n+1}^T + R_{n+1}(n+1)]^{-1}$
3. $\hat{x}_{n+1}(n+1) = \Phi_{n+1} \hat{x}_{n+1}(n) + K_{n+1}(n+1) [y_{n+1}(n+1) - \Phi_{n+1} \hat{x}_{n+1}(n)]$
4. $\hat{x}_{n+1}(n+1) = \Phi_{n+1} \hat{x}_{n+1}(n) + K_{n+1}(n+1) [y_{n+1}(n+1) - \Phi_{n+1} \hat{x}_{n+1}(n)]$
5. $P_{n+1}(n+1) = [I - K_{n+1}(n+1) \Phi_{n+1}^T] P_{n+1}(n)$
6. $n = n + 1$ go back 1.
[行列]
行列の逆行列の演算量が多い

発明手法 2

[Iteration]
for $n = 0$
1. $P_{n+1}(n+1) = \Phi_{n+1} P_{n+1}(n) \Phi_{n+1}^T + R_{n+1}(n+1)$
2. $K_{n+1}(n+1) = [P_{n+1}(n+1) \Phi_{n+1}^T] [P_{n+1}(n+1) \Phi_{n+1}^T + R_{n+1}(n+1)]^{-1}$
3. $\hat{x}_{n+1}(n+1) = \Phi_{n+1} \hat{x}_{n+1}(n) + K_{n+1}(n+1) [y_{n+1}(n+1) - \Phi_{n+1} \hat{x}_{n+1}(n)]$
4. $\hat{x}_{n+1}(n+1) = \Phi_{n+1} \hat{x}_{n+1}(n) + K_{n+1}(n+1) [y_{n+1}(n+1) - \Phi_{n+1} \hat{x}_{n+1}(n)]$
5. $P_{n+1}(n+1) = [I - K_{n+1}(n+1) \Phi_{n+1}^T] P_{n+1}(n)$
6. $n = n + 1$ go back 1.
[スカラー]
スカラーの逆数の演算量は 1 回
演算量の軽減

【図 4 4】



【図 4 5】

復元処理速度評価

処理速度比較

画像サイズ (pixel)	従来手法 3 (秒)	従来手法 1 (秒)	従来手法 2 (秒)
256 x 256	20.8	10.6	6.3
512 x 512	83.1	43.0	26.2

スペック表

OS	Microsoft Windows XP Professional
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-920 @2.67GHz
メモリ	2GB

発明手法 2 は

AR 係数導出の演算量が不要
従来手法 1 よりも高速な処理が可能
従来手法 3 < 従来手法 1 < 従来手法 2
従来手法 2 は高速な画像復元処理が可能

【図 4 6】

シミュレーション条件

原画像: Camera man, Lenna(256× 256size)

雑音: 加法性白色ガウス雑音

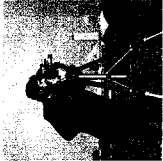
PSFのモデル: 2次元ガウス関数

$$h(u,v)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}\exp\left(-\frac{u^2+v^2}{2\sigma^2}\right),\sigma^2=0.5$$

SNR(Signal to Noise Ratio)

$$SNR_n=10\log_{10}\frac{1}{256\times 256}\frac{\sigma_b^2}{\sum_{x=1}^{256}\sum_{y=1}^{256}[b(x,y)-g(x,y)]^2}$$

$b(x,y)$: ぼけ画像, $g(x,y)$: 劣化画像



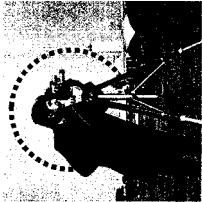
Camera man



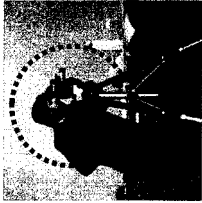
Lenna

【図 4 7】

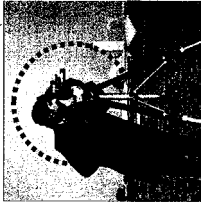
シミュレーション結果: Camera man



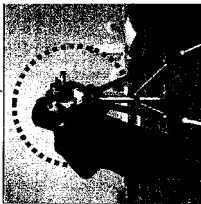
原画像



劣化画像 (原画像+ぼけ+雑音)



従来手法1



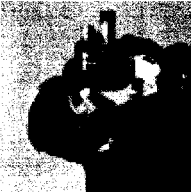
発明手法2

【図 4 8】

シミュレーション結果: Camera man 拡大



原画像



劣化画像 (原画像+ぼけ+雑音)



従来手法3



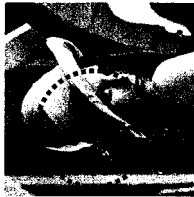
発明手法2

【図 4 9】

シミュレーション結果: Lenna



原画像



劣化画像 (原画像+ぼけ+雑音)



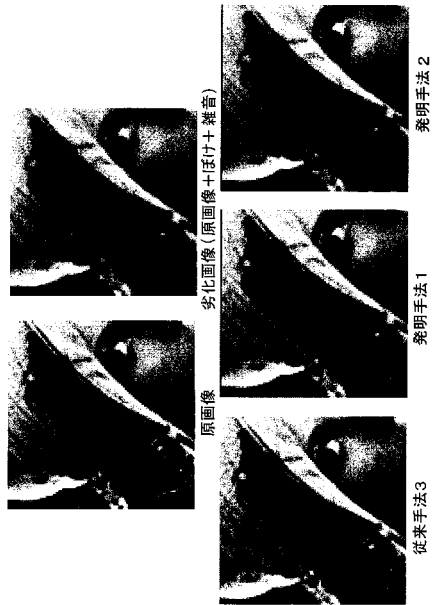
従来手法3



発明手法2

【図 50】

シミュレーション結果 : Lenna 拡大



【図 51】

客観評価 (数値による評価)

原画像と復元画像の PSNR

$$PSNR = 20 \log_{10} \frac{\sum_{x=1}^{256} \sum_{y=1}^{256} f(x,y)^2}{\sum_{x=1}^{256} \sum_{y=1}^{256} [f(x,y) - \hat{f}(x,y)]^2} [dB]$$

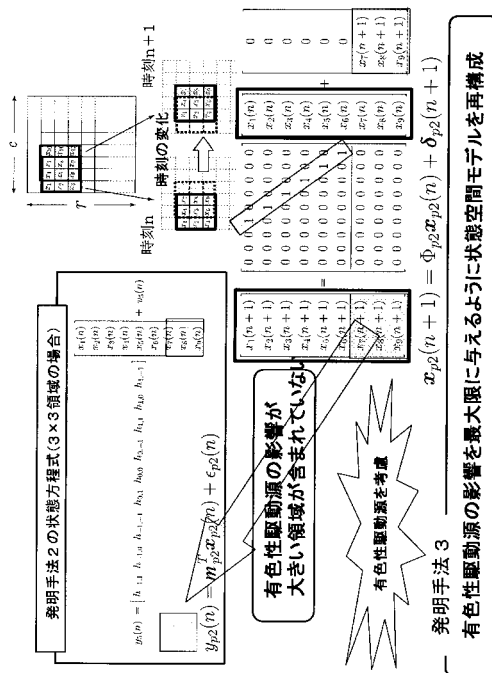
シミュレーション結果に基づく評価 [dB]

	従来手法3	従来手法1	従来手法2
Camera man	25.5	26.2	26.5
Lenna	27.4	28.3	28.8

従来手法3 < 従来手法1 < 従来手法2

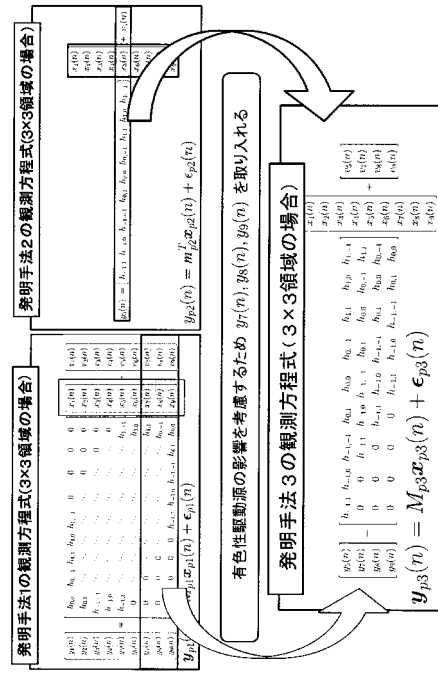
従来手法2は性能を維持しながら
演算量の大幅な軽減に成功

【図 52】



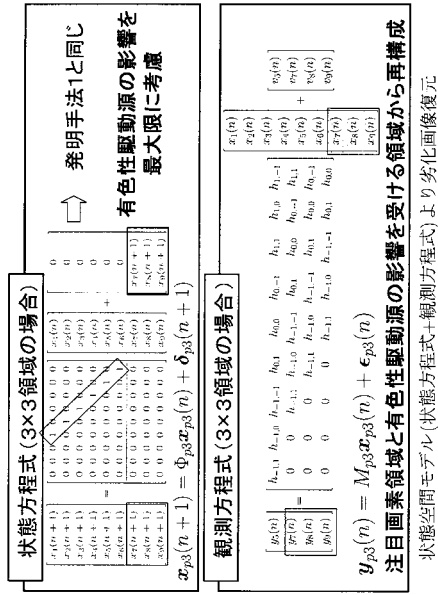
【図 53】

発明手法3 (観測過程)

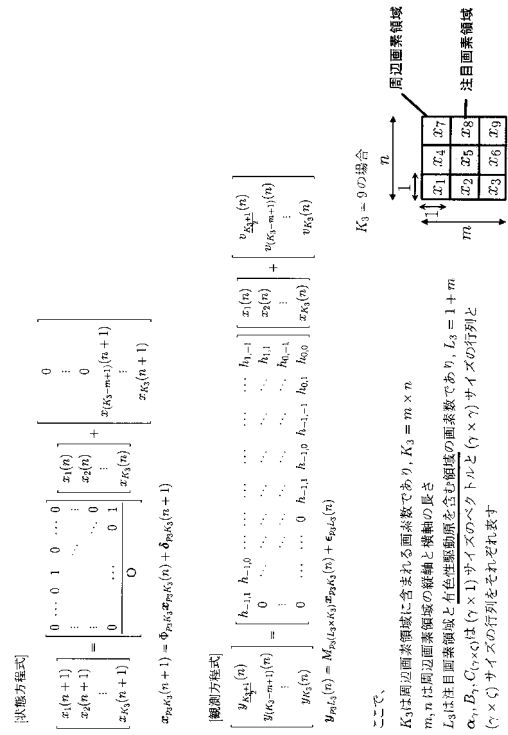


【図 5 4】

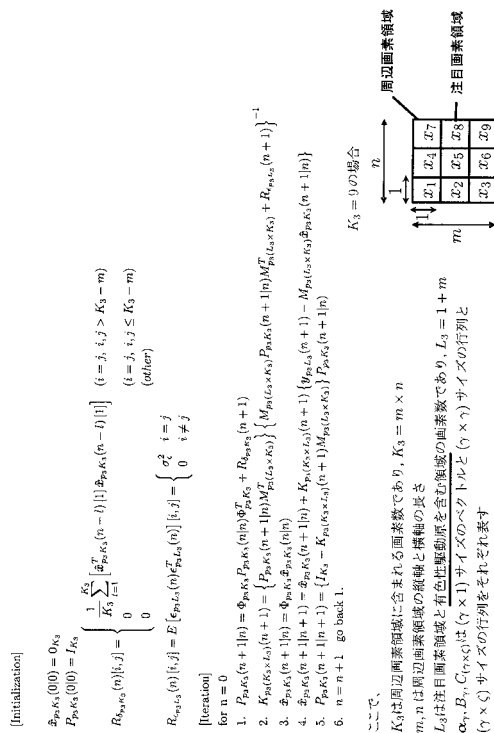
発明手法 3 (状態空間モデル)



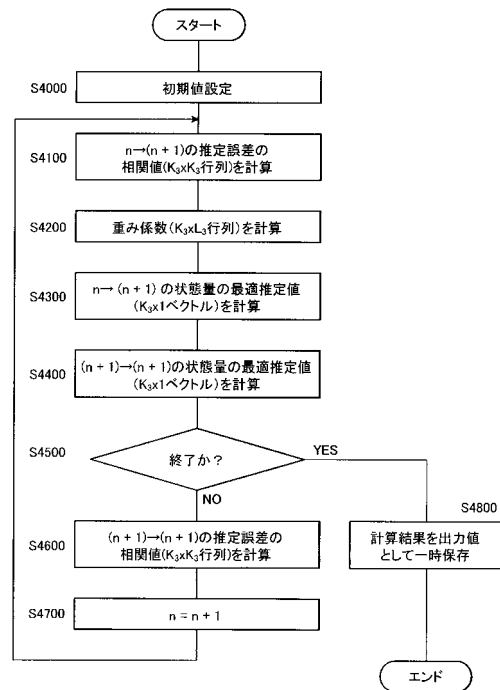
【図 5 5】



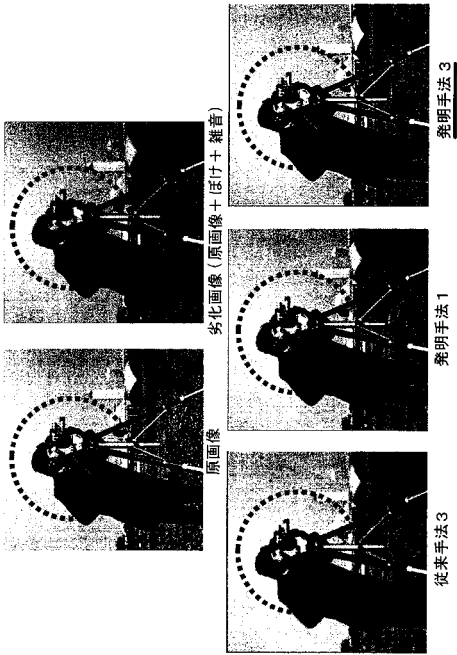
【図 5 6】



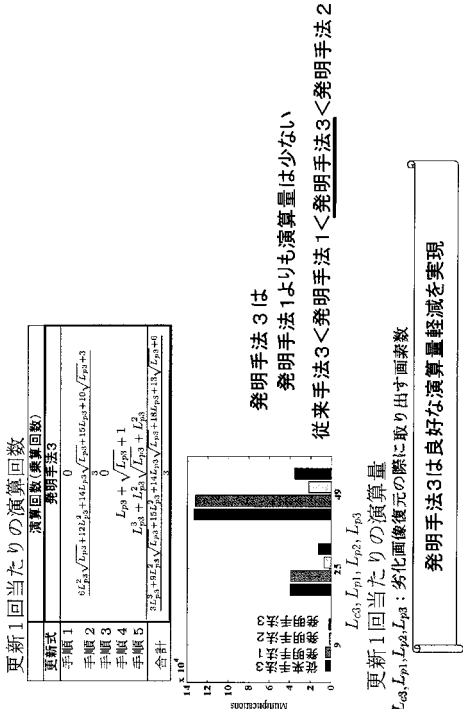
【図 5 7】



シミュレーション結果：Camera man



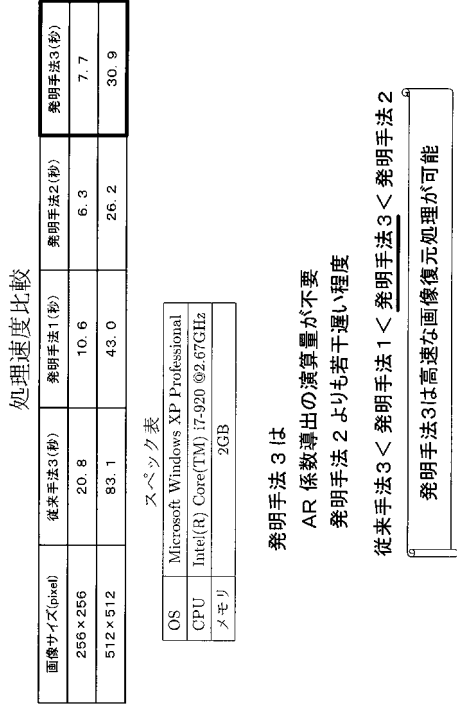
演算量評価



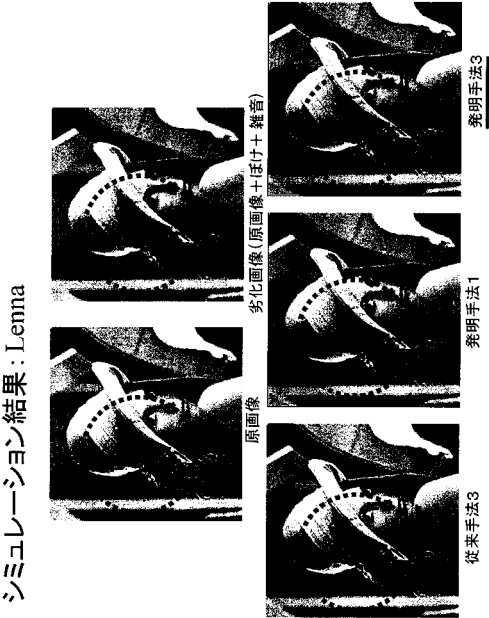
シミュレーション結果：Camera man 拡大



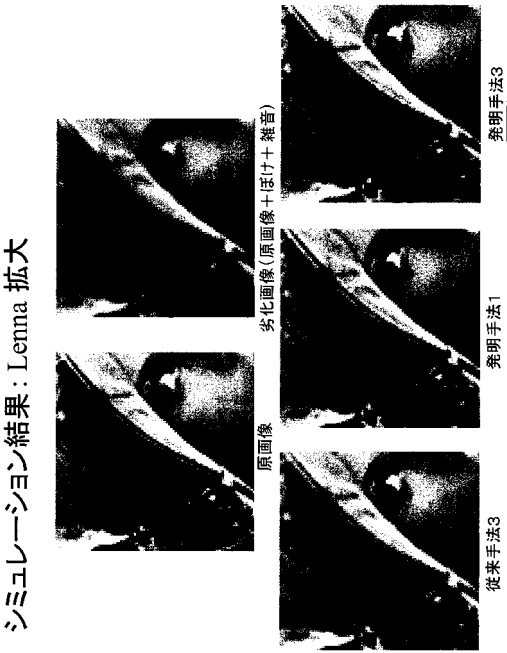
復元処理速度評価



【図 6 2】



【図 6 3】



【図 6 4】

客観評価 (数値による評価)

原画像と復元画像の PSNR

$$PSNR = 20 \log_{10} \frac{\sum_{x=1}^{256} \sum_{y=1}^{256} f(x,y)^2}{\sum_{x=1}^{256} \sum_{y=1}^{256} [f(x,y) - \hat{f}(x,y)]^2} [dB]$$

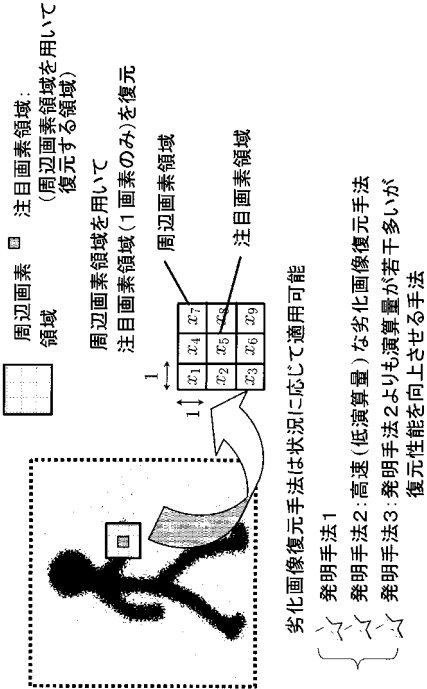
シミュレーション結果に基づく評価 [dB]

	従来手法3	発明手法1	発明手法2	発明手法3
Camera man	25.5	26.2	26.5	28.6
Lenna	27.4	28.3	28.8	31.8

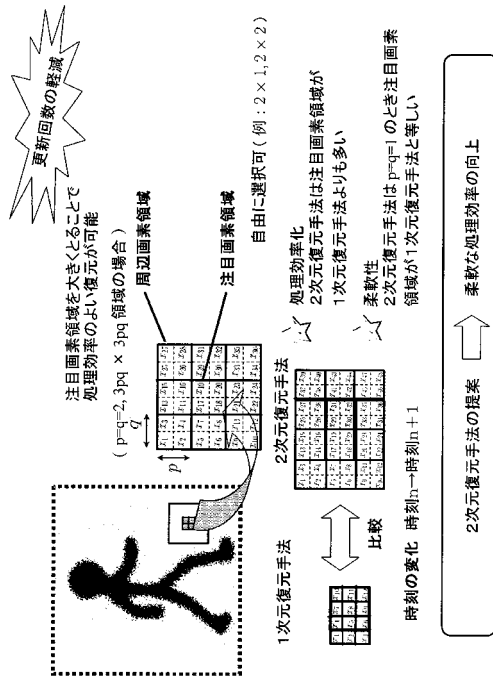
従来手法3 < 発明手法1 < 発明手法2 < 発明手法3

発明手法3の良好な劣化画像復元性能を確認

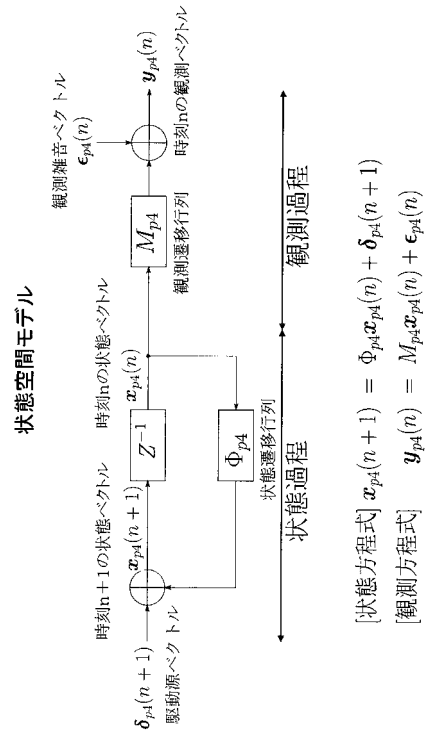
【図 6 5】



【 図 6 6 】

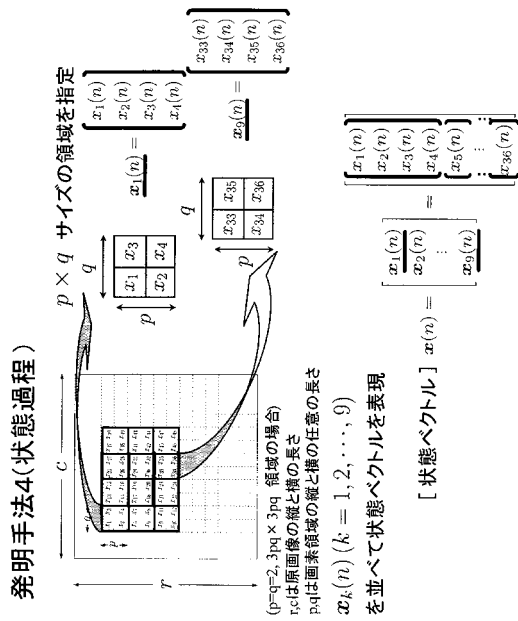


【 図 6 7 】

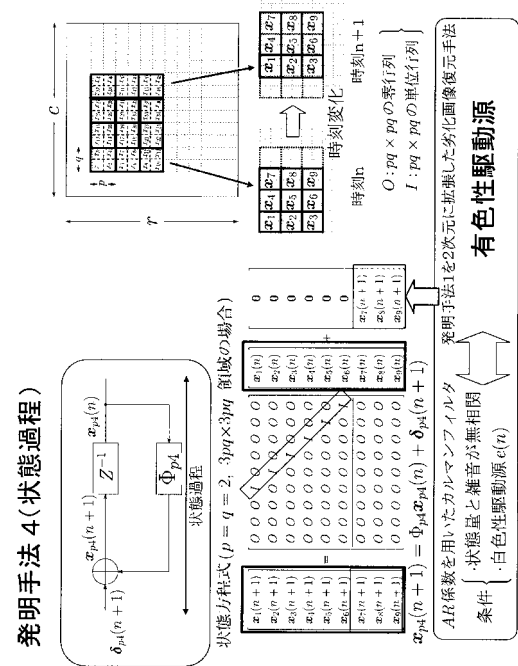


尧明手法4

【 図 6 8 】

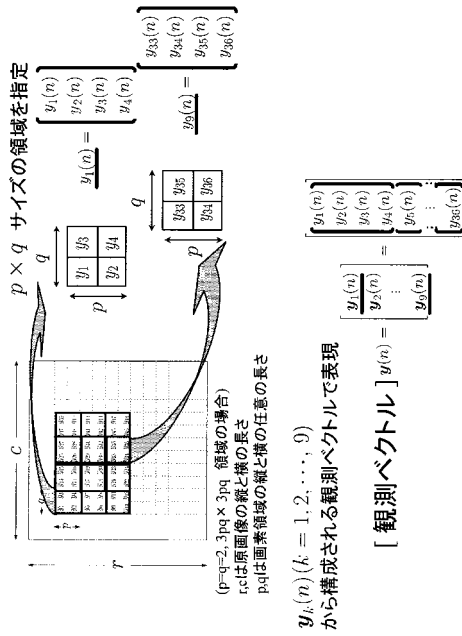


【 図 6 9 】



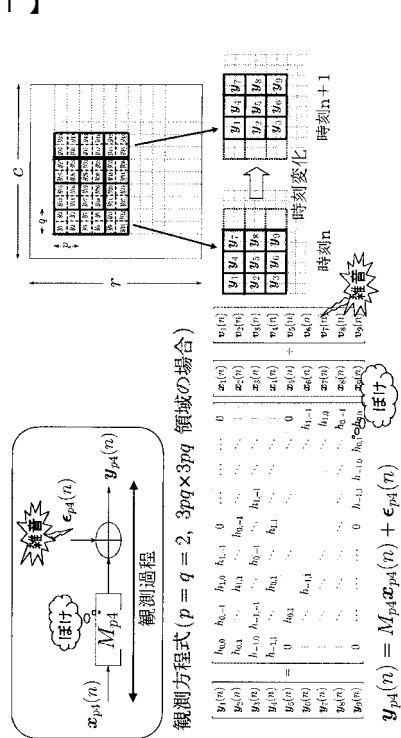
【 図 7 0 】

發明手法4(觀測過程)



【圖 7 1】

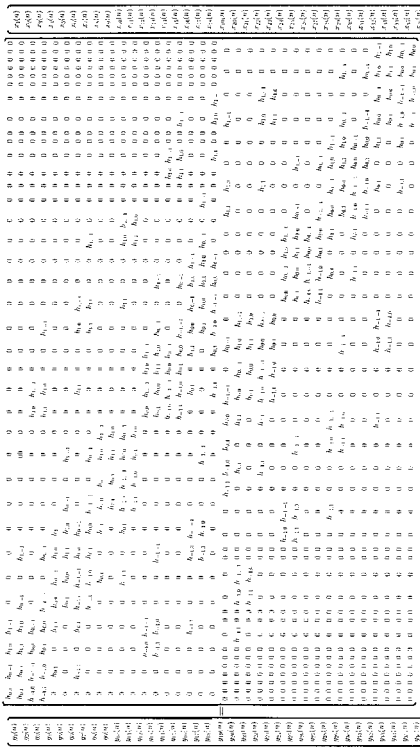
發明手法4(觀測過程)



状態空間モデル(状態方式+観測方程式)により劣化画像復元

【 図 7 2 】

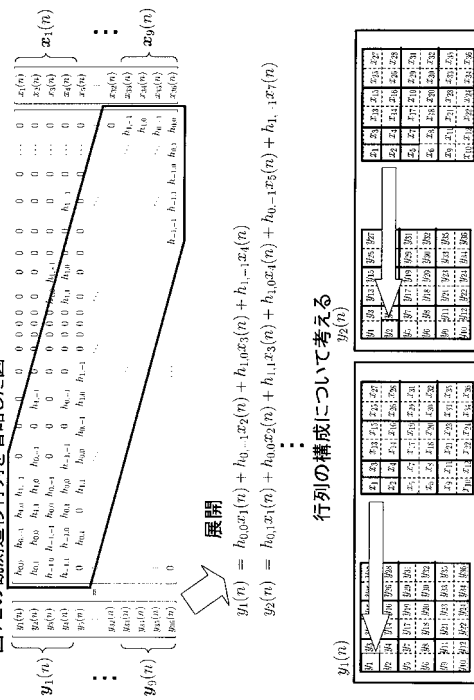
発明手法4の観測遷移行列 (PSF関数行列). ($p = q = 2 \cdot 3pq \times 3pq$ 領域の場合)



$$y_{p^4}(n) = M_{p^4} x_{p^4}(n)$$

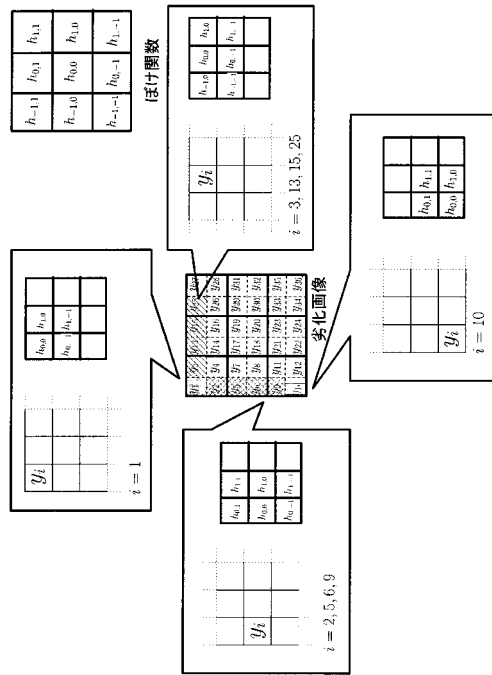
【 図 7 3 】

図72の観測遷移行列を省略した図

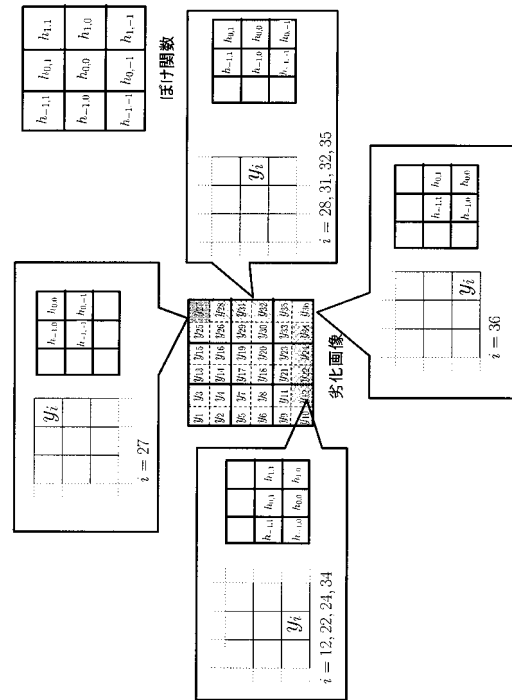


行列の構成について考える

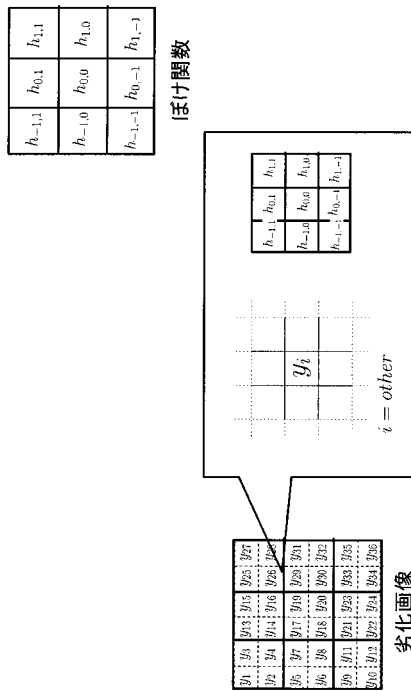
【図 74】



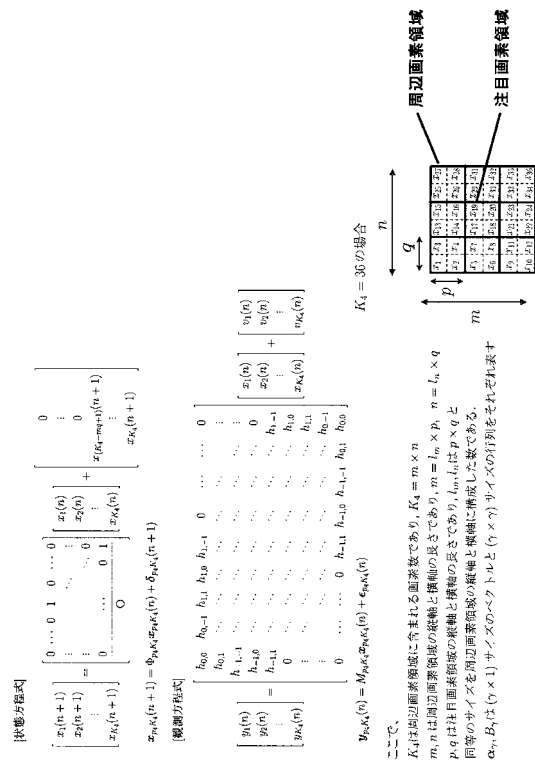
【図 75】



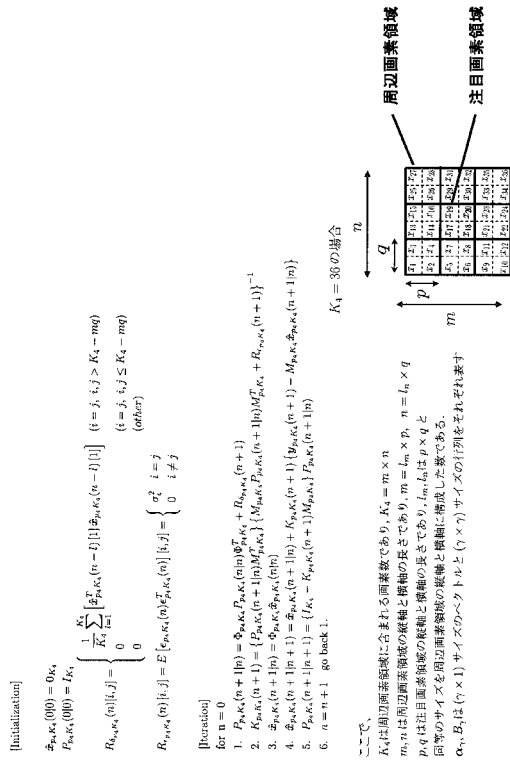
【図 76】



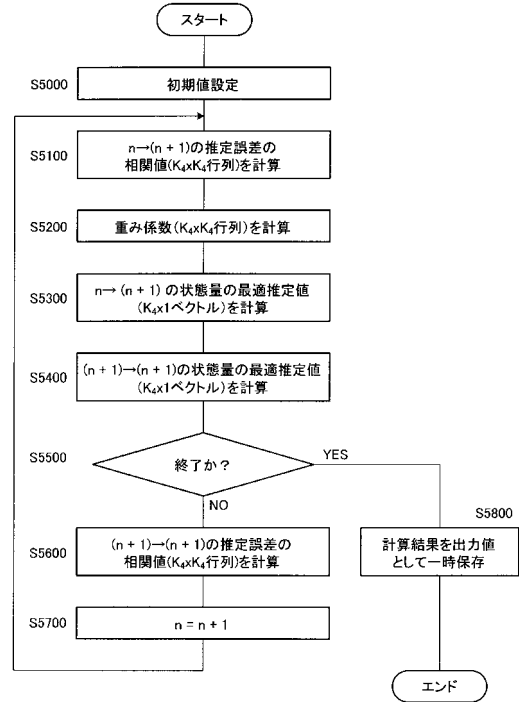
【図 77】



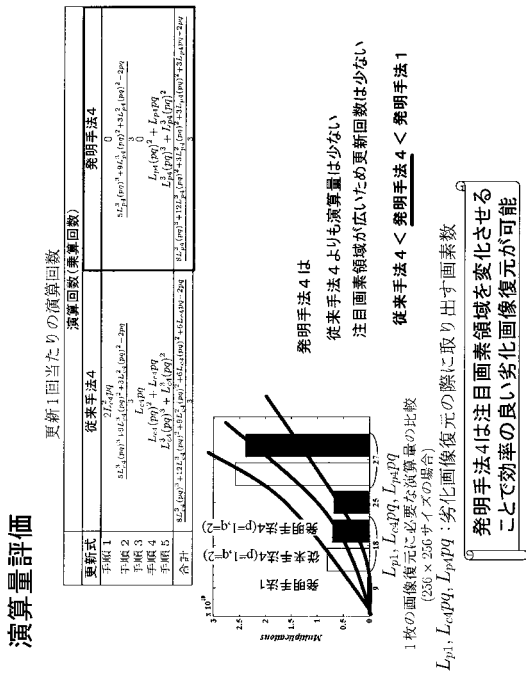
【図 78】



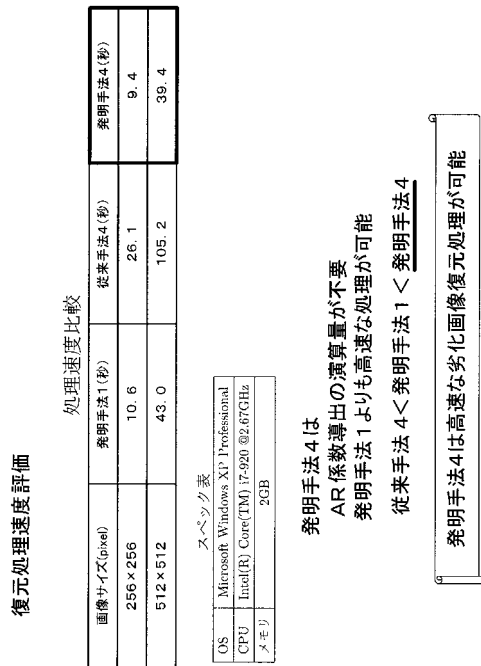
【図 79】



【図 80】

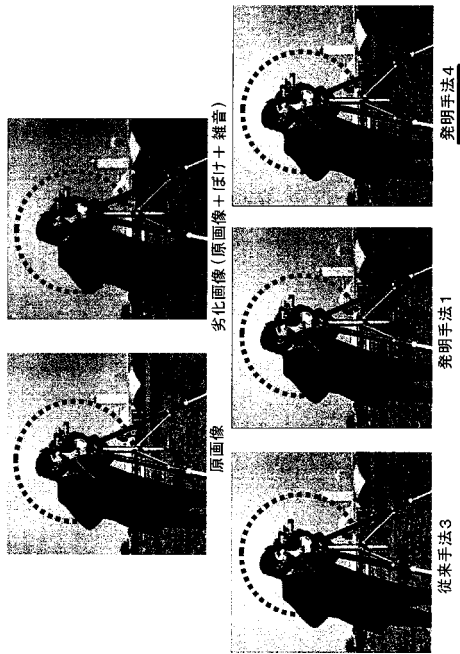


【図 81】



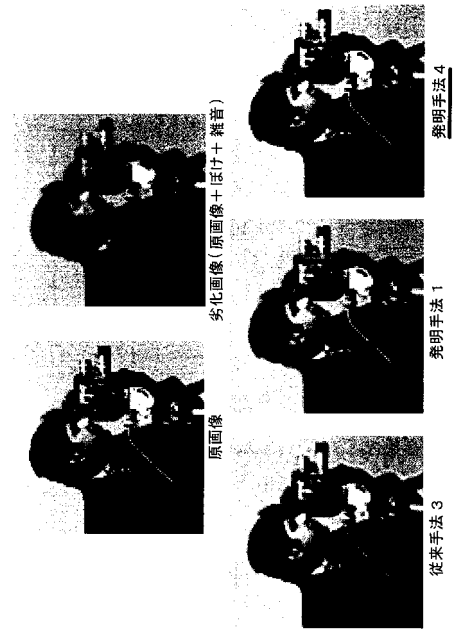
【図 8 2】

シミュレーション結果 : Camera man



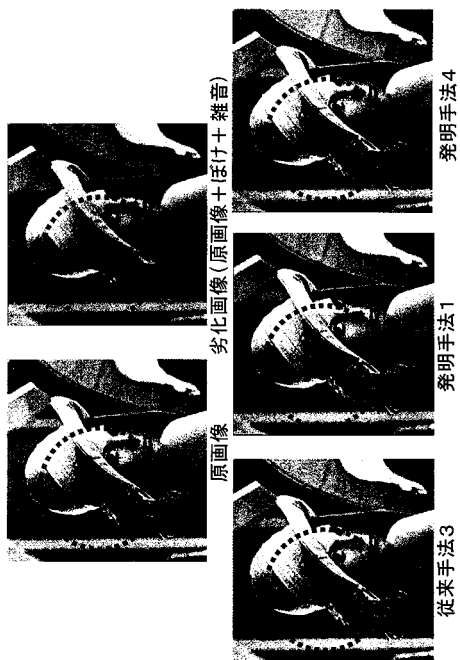
【図 8 3】

シミュレーション結果 : Camera man 拡大



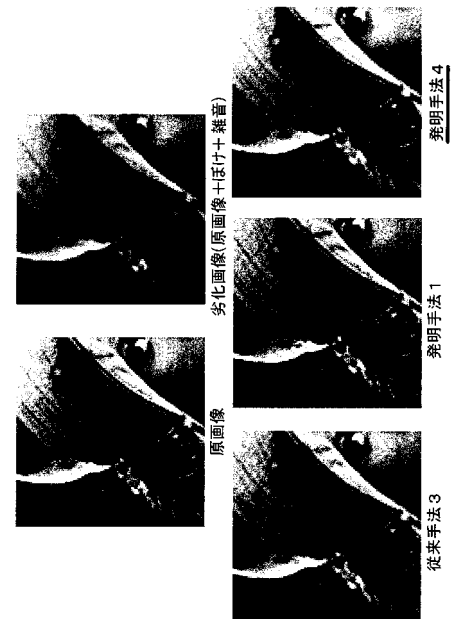
【図 8 4】

シミュレーション結果 : Lenna



【図 8 5】

シミュレーション結果 : Lenna 拡大



【 図 8 6 】

客観評価(数値による評価)

原画像と復元画像の $PSNR$

$$PSNR = 20 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^{256} \sum_{y=1}^{256} f(x, y)^2}{\sum_{i=1}^{256} \sum_{y=1}^{256} [f(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2} [dB]$$

シミュレーション結果に基づく評価[dB]

	捉来手法3	象明手法1	象明手法2	象明手法3	象明手法4
Camera man	25.5	26.2	26.5	28.6	27.9
Lanna	27.4	28.3	28.8	31.8	29.3

從來手法 3 < 發明手法 1 < 發明手法 2 < 發明手法 4 < 發明手法 3

発明手法4の良好な劣化画像復元性能を確認

【圖 8 7】

時刻の変化は画素領域の遷移を用いて表わす

時刻 $n+1$ では周辺画素領域

注目画素領域のみを求めればよい

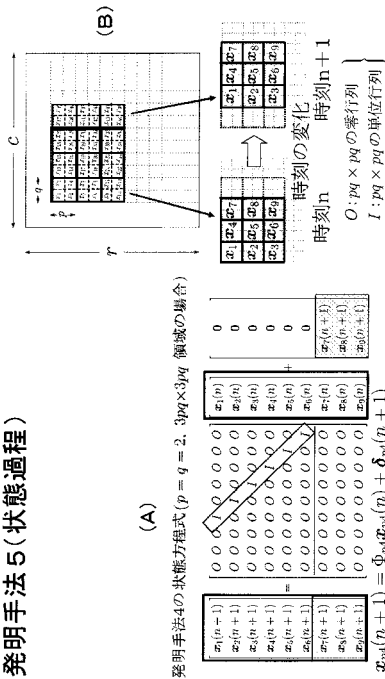
他の要素の推定は不要

注目画素領域のみ考慮した状態空間モデルを再構成（観測方程式を再構成することで注目画素領域のみ抽出）

高速（低演算量）な劣化画像復元を提案

【 図 8 8 】

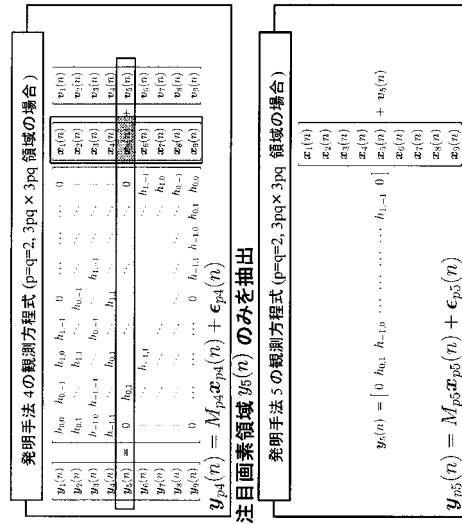
發明手法5(狀態過程)



發明手法5の狀態方程式:發明手法4と同じ

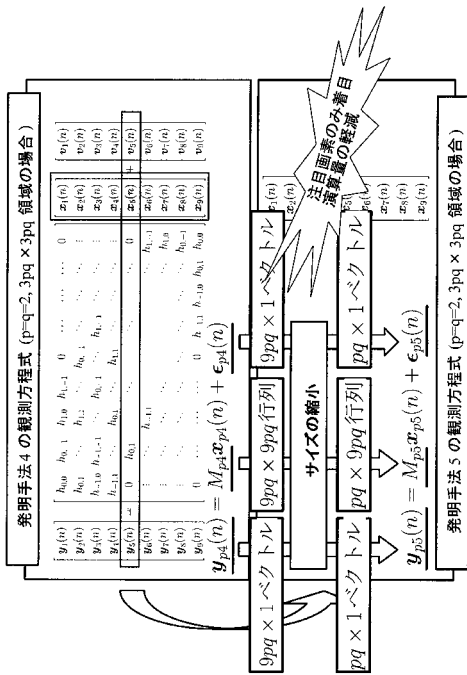
【 図 8 9 】

發明手法5(觀測過程)

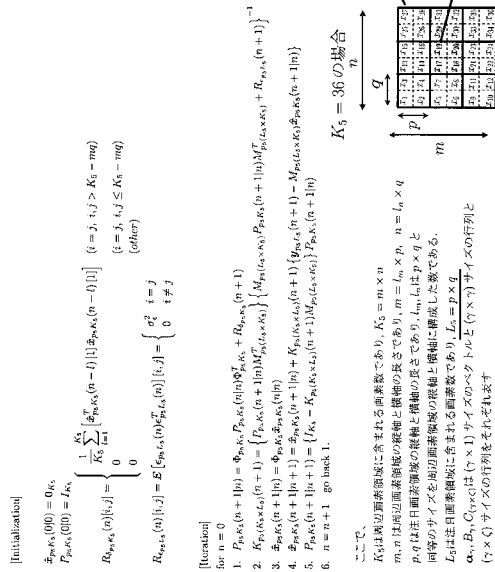


【図 90】

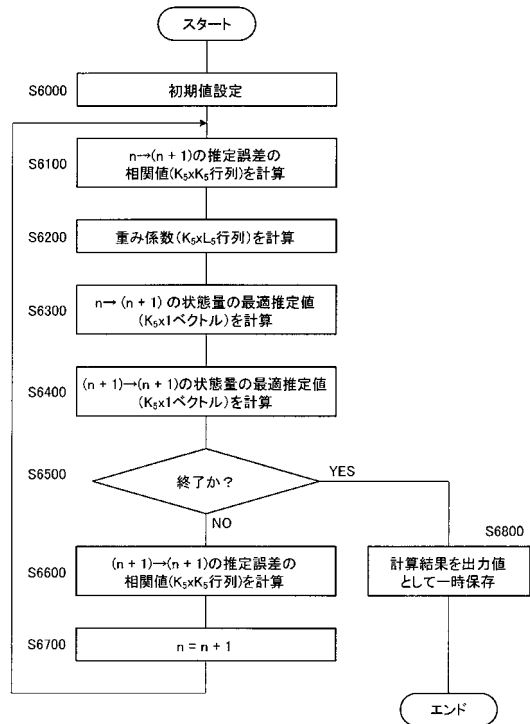
発明手法 5 (観測過程)



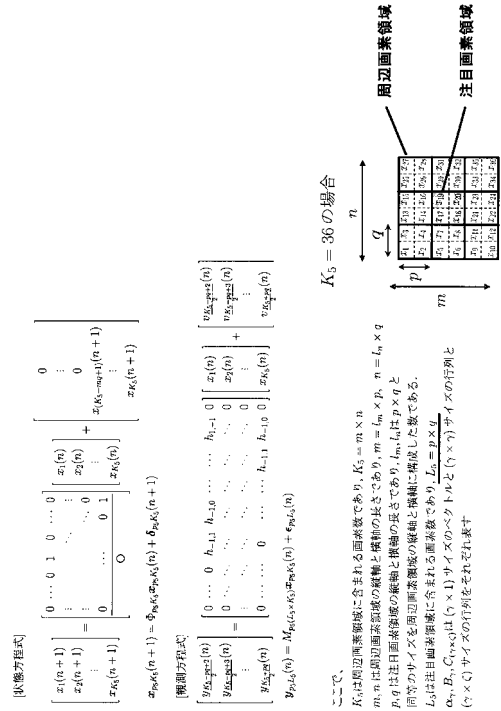
【図 92】



【図 93】



【図 91】



【図 9 6】

復元処理速度評価

処理速度比較				
画像サイズ(pixel)	発明手法1(秒)	従来手法4(秒)	発明手法4(秒)	発明手法5(秒)
256×256	10.6	26.1	9.4	3.2
512×512	43.0	105.2	39.4	12.7

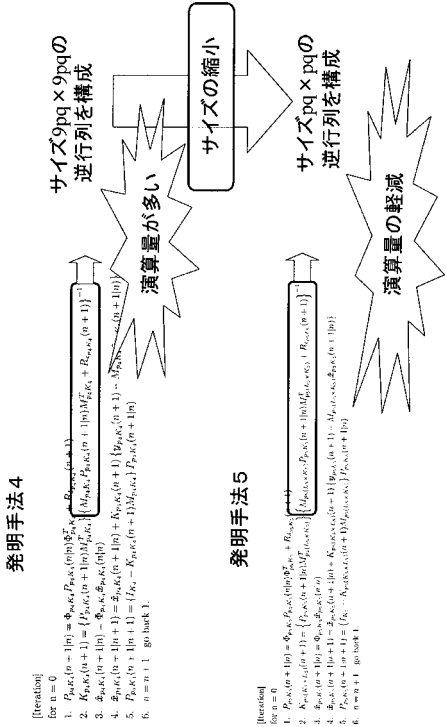
スペック表

OS	Microsoft Windows XP Professional
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-920 2.67GHz
メモリ	2GB

発明手法5は
AR 係数導出の演算量が不要
発明手法1 よりも高速な処理が可能
従来手法 4<発明手法1 < 発明手法4< 発明手法5
発明手法5は高速な画像復元処理が可能

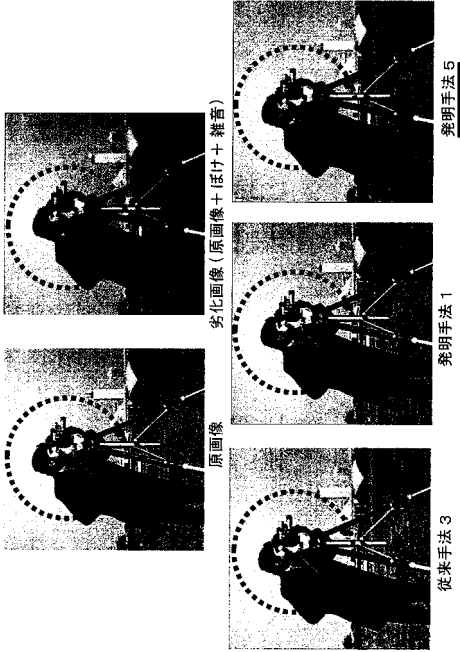
【図 9 4】

アルゴリズムの比較(p=q=2, 3pq×3pq 領域の場合)



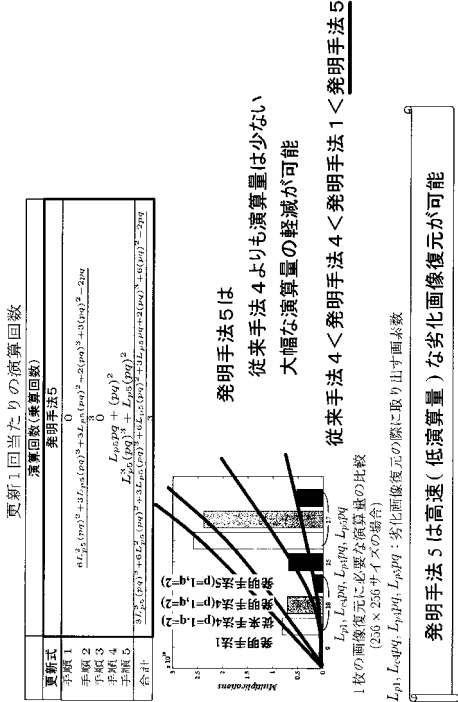
【図 9 7】

シミュレーション結果：Camera man

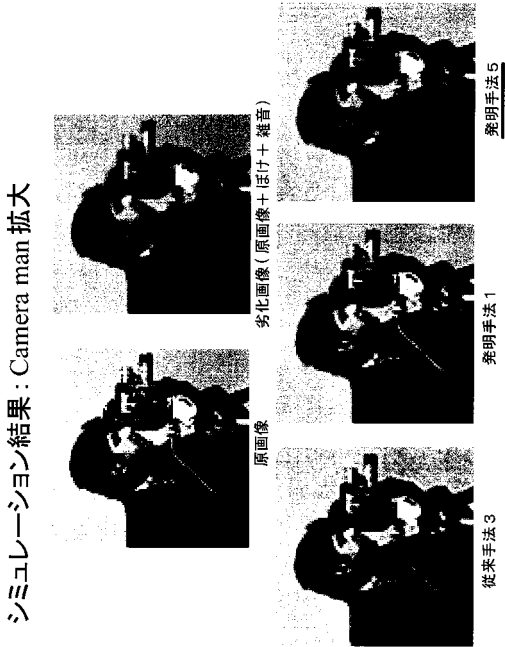


【図 9 5】

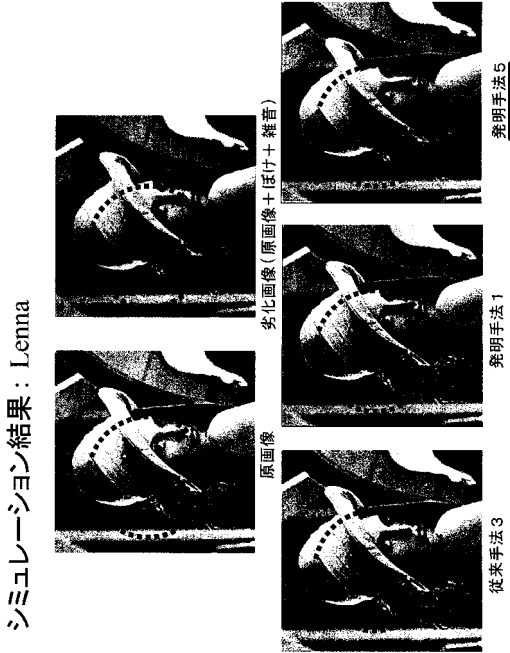
演算量評価



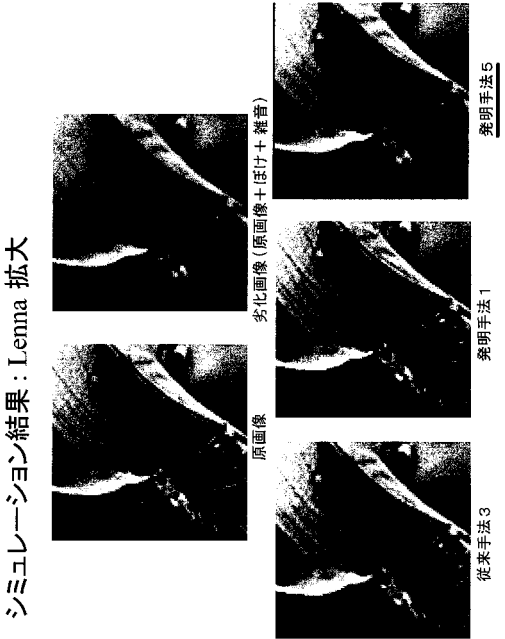
【図 98】



【図 99】



【図 100】



【図 101】

客観評価 (数値による評価)

原画像と復元画像の PSNR

$$PSNR = 20 \log_{10} \frac{\sum_{x=1}^{256} \sum_{y=1}^{256} f(x,y)^2}{\sum_{x=1}^{256} \sum_{y=1}^{256} [f(x,y) - \hat{f}(x,y)]^2} [dB]$$

シミュレーション結果に基づく評価 [dB]

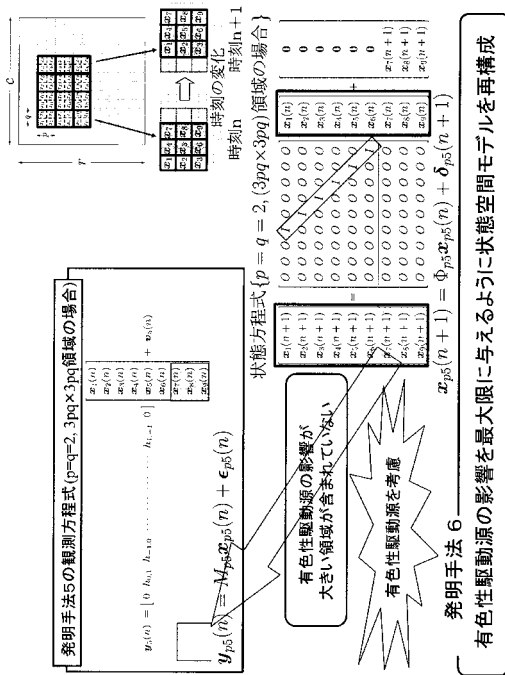
	従来手法3	従来手法1	従来手法2
Camera man	26.5	26.2	26.5
Lenna	27.4	26.3	28.8

	従来手法3	従来手法4	従来手法5
Camera man	28.6	27.9	28.0
Lenna	31.8	29.3	28.6

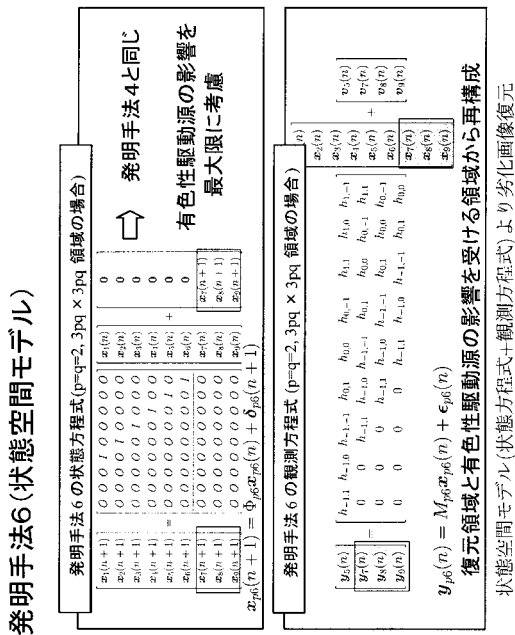
従来手法3 < 従来手法1 < 従来手法2 < 従来手法4 < 従来手法5

従来手法5は演算量の軽減により高速かつ
処理効率の向上した劣化画像復元手法

【図 102】

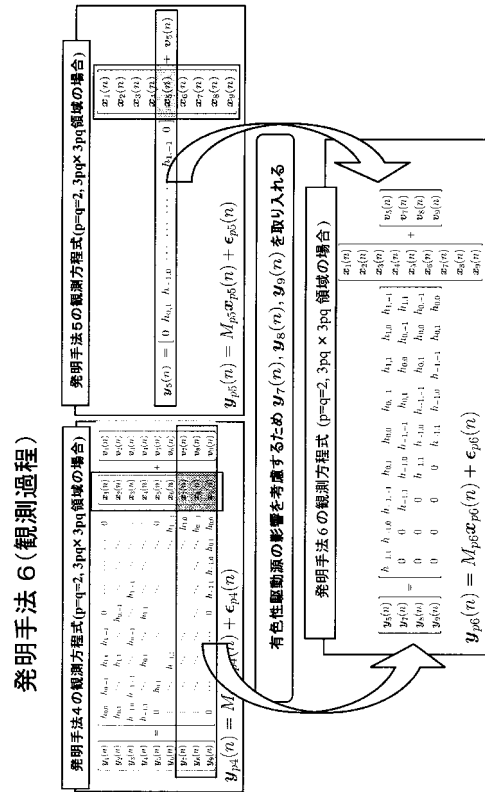


【図 104】



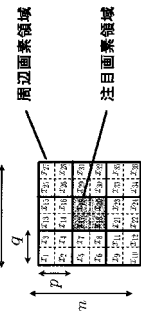
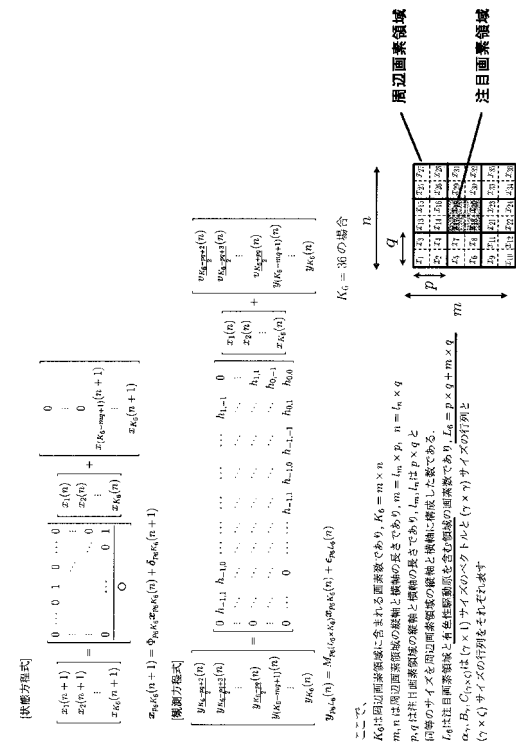
発明手法6 (状態空間モデル)

【図 103】

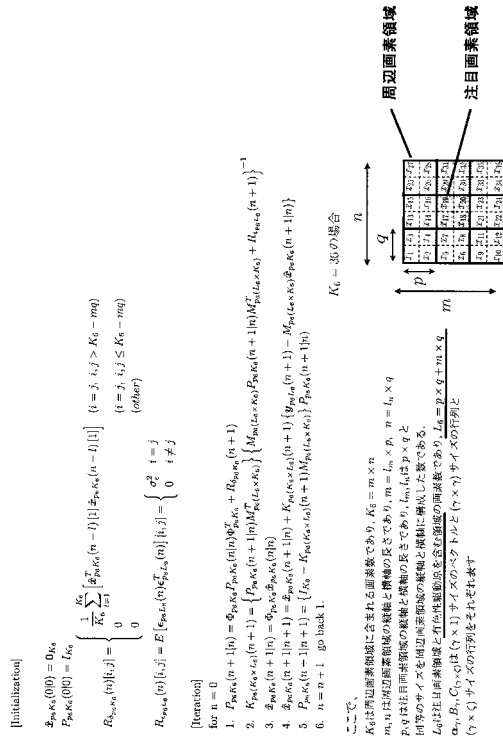


発明手法 6 (観測過程)

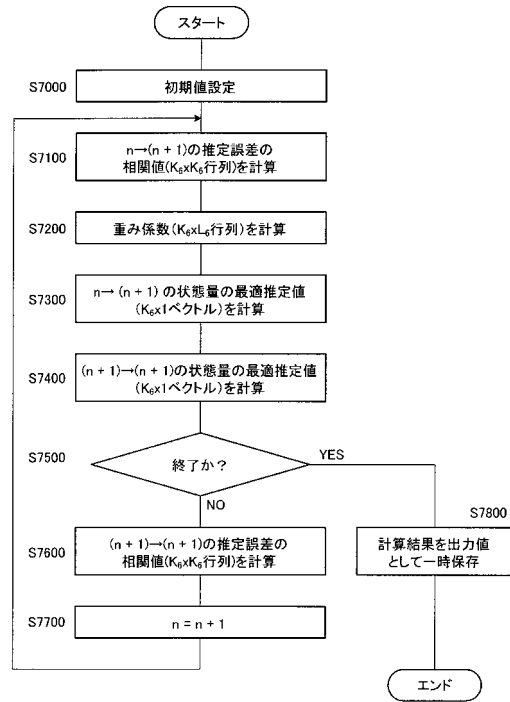
【図 105】



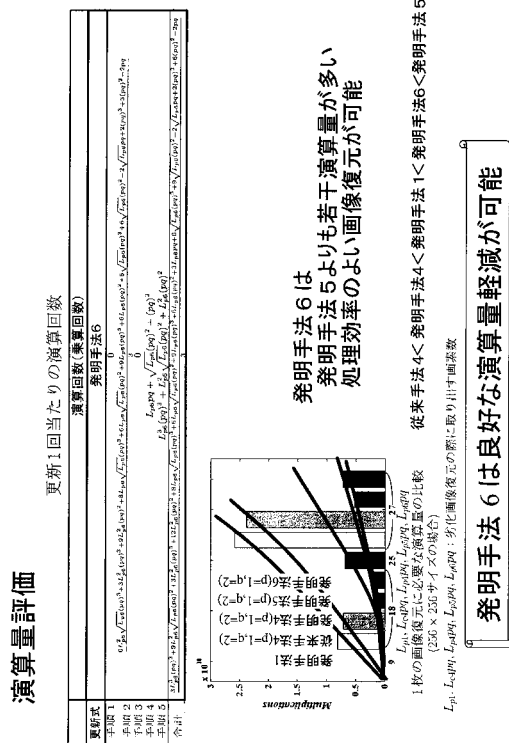
【図106】



【図107】

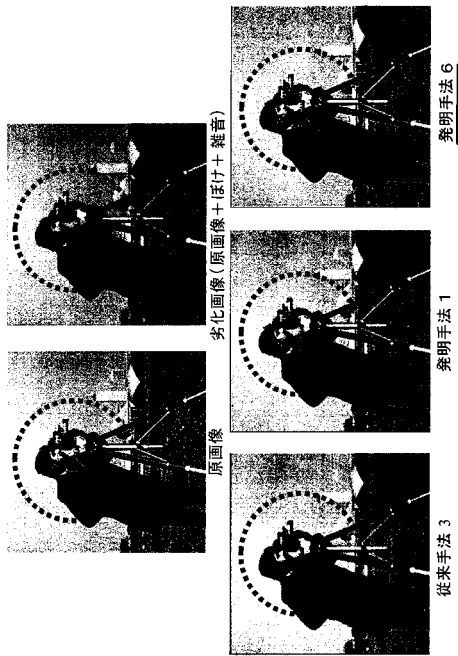


【図108】



【図 1 1 0】

シミュレーション結果：Camera man



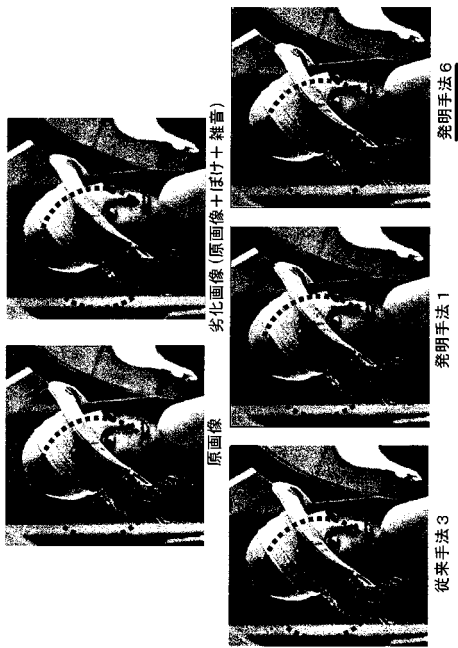
【図 1 1 1】

シミュレーション結果：Camera man 拡大



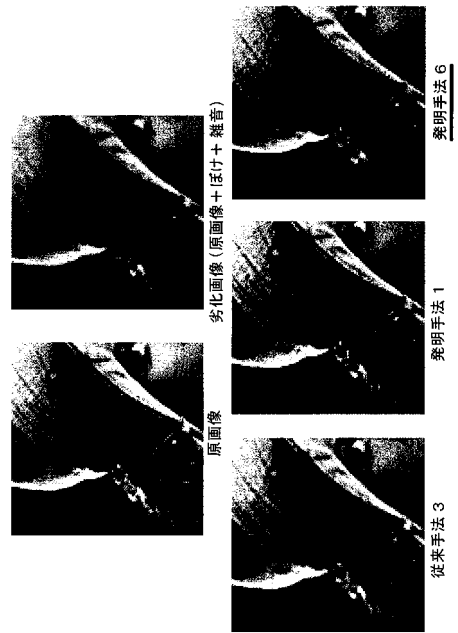
【図 1 1 2】

シミュレーション結果：Lenna



【図 1 1 3】

シミュレーション結果：Lenna 拡大



【図 1 1 4】

客観評価 (数値による評価)

原画像と復元画像の PSNR

$$PSNR = 20 \log_{10} \frac{\sum_{x=1}^{256} \sum_{y=1}^{256} f(x,y)^2}{\sum_{x=1}^{256} \sum_{y=1}^{256} [f(x,y) - \hat{f}(x,y)]^2} [dB]$$

シミュレーション結果に基づく評価 [dB]

	従来手法3	発明手法1	発明手法2	発明手法3
Camera man	25.5	26.2	26.5	28.6
Lenna	27.4	28.3	28.8	31.8

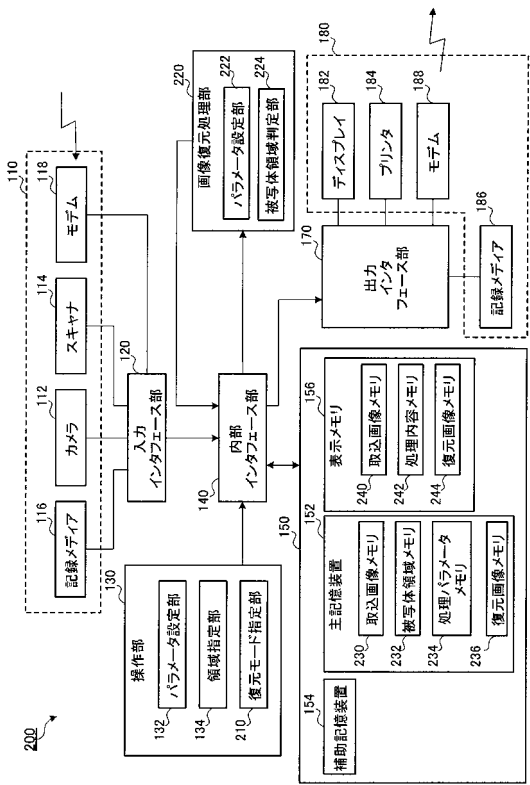
	発明手法4	発明手法5	発明手法6
Camera man	27.9	28.0	28.8
Lenna	29.3	28.6	31.9

Good

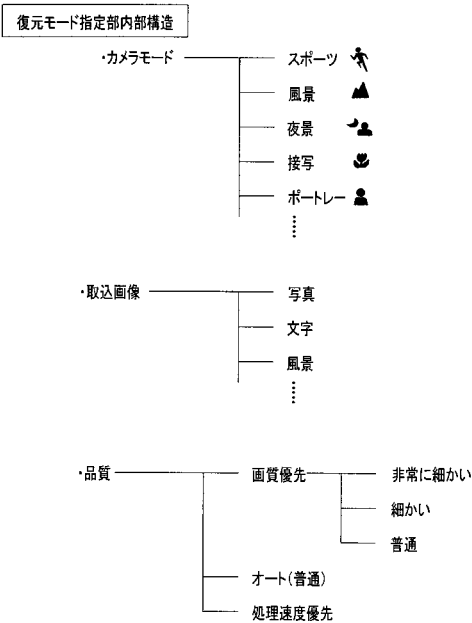
従来手法3 < 発明手法1 < 発明手法5 < 発明手法2 < 発明手法4 < 発明手法3 < 発明手法6

発明手法6の良好な劣化画像復元性能を確認

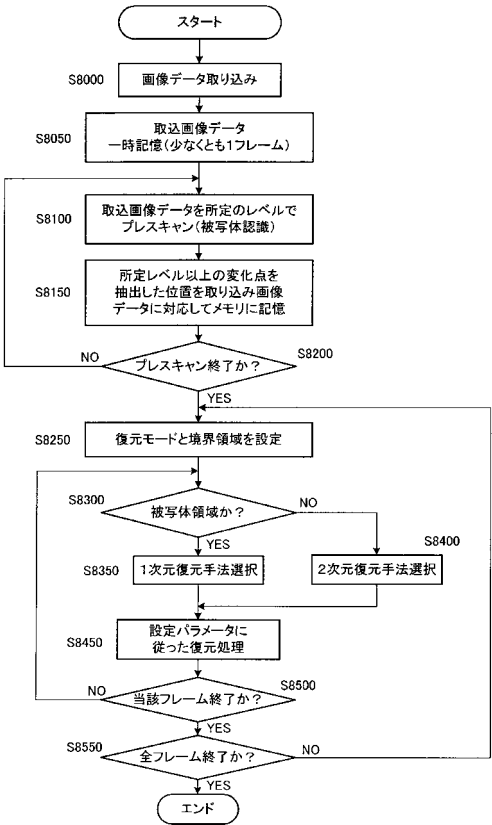
【図 1 1 5】



【図 1 1 6】



【図 1 1 7】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開平 1 1 - 0 2 3 7 2 7 (J P , A)

国際公開第 2 0 0 9 / 1 1 6 2 9 1 (W O , A 1)

田邊 造 他, 有色性駆動雑音を考慮したカルマンフィルタを用いた雑音抑圧法 Noise Suppressi
on with High Performance u, 電子情報通信学会技術研究報告 IEICE Technical Report, 日本
, 社団法人電子情報通信学会, 2 0 0 8 年 2 月 2 9 日, E A 2 0 0 7 - 1 2 5, p . 7 9 - 8
4

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

G 0 6 T 5 / 2 0

H 0 4 N 1 / 4 0 9