撮影画像数の指定可能な超解像処理制御系

大 西 悟*・小木曾 公 尚**

Super-resolution Process Control System Possible to Specify Image Number

Satoru ONISHI* and Kiminao KOGISO**

This paper presents a super-resolution process control system for maintaining good super-resolution performance. Our idea for the maintenance is that the already existing head control system is developed by adding head's rotation velocity constraint and reference governor to guarantee acquisition of the specified number of images used for the super-resolution process. An effectiveness of the development is confirmed via experimental verification, compared to our previous work.

Key Words: super-resolution image reconstruction, observer, reference governor, constraint

1. はじめに

近年、画像処理技術の急速な発展に伴い、画像の高画質化に対する需要が高まっている。高解像度画像を得る技術として、位置ずれのある複数枚の低解像度画像から高解像度画像を生成する超解像処理^{1)~3)}が注目されており、医療、衛星、セキュリティ監視などにおいて役立つことが期待されている。

筆者らは、可動雲台に固定されたカメラが動きながら、静止の被写体を撮影する動的な状況において、画像が撮影されると同時に取得時の雲台の状態情報を利用する超解像処理制御系を提案した⁴⁾。この手法の特徴は、位置ずれやブレの推定をオブザーバで実現する点にあるが、一方で、雲台の動作が速くなる場合、超解像処理の結果が劣化することがある。これは、超解像結果の良し悪しが撮影画像の枚数に依存しており、カメラの首振り動作が速くなることで、超解像化したい領域を含む撮影画像数が減少することに起因する。簡潔に言えば、超解像結果を左右する画像数と制御系の即応性には、トレードオフの関係がある。

そこで、本稿の目的は、雲台の動作が速くなる状況でも、より鮮明な高解像度画像を生成するために、ある一定枚数の撮影画像を確保可能な超解像処理制御系を提案することである。具体的には、撮影画像枚数に応じた速度拘束を設定し、これを満たす動作を実現する拘束系の制御問題に帰着させる。本手法では、リファレンスガバナ⁵⁾を用いて実現し、その位置づけとしては、従来法⁴⁾の拡張にあたる。そして、実機実験を通して、指定した枚数の画像を取得できること、また、従来法に比べて超解像処理結果が良くなることを確認する。

2. 問題設定

本稿では、被写体を静止物とし、パン軸方向に回転する可動雲台にカメラが取り付けられた撮影装置を想定し、回転しながら被写体を撮影する状況を考える。このとき、この可動雲台を制御対象とし、安定化コントローラによって制御系設計が施され、目標値を w [rad] とするカメラの位置決め制御系が構築されているとする。入力電圧 u [V] から出力 y [rad] までの制御対象は、つぎのように表わされる。

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t), \quad y(t) = [1 \ 0]x(t) \quad (1)$$

ここで、状態は、 $x = [\theta \ \dot{\theta}]^T$ である。カメラの回転角度 θ [rad] は、計測可能だが、計測不可な角速度 $\dot{\theta}$ については、オブザーバ: $\hat{x}(t+1) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t))$, $\hat{y}(t) = [1 \ 0]\hat{x}(t)$ による推定を行なう。ただし、 L は、オブザーバゲイン、 $\hat{x} = [\hat{\theta} \ \hat{\dot{\theta}}]^T$ は、状態 x の推定値を表わす。

オブザーバを含む制御系が与えられ、超解像処理で用いる最低限の画像数を $N > 0$ とする。本稿の問題設定は、入力を目標値 w と画像の枚数 N 、出力を高解像度画像 X とする超解像処理制御系を構築することである。この系では、カメラの素早い回転動作により、超解像化に用いる画像数が確保できなくなる状況を回避し、常に良好な超解像処理結果を維持させることが目的となる。ここで、 N 枚の撮影画像を $Y_\ell \in \mathbf{R}^{mn}$ ($\ell = 1, \dots, N$) とし、生成画像 $X \in \mathbf{R}^{\alpha^2 mn}$ を基準画像 Y_k に対する高解像度画像とする。ただし、 α を解像度の倍率、 $k = \frac{N+1}{2}$ (N : 奇数)、 $k = \frac{N}{2}$ (N : 偶数) とする。従来法との相違点は、系の入力において撮影画像枚数 N が指定可能な点にある。なお、本稿では、パン動作する制御対象を考えているが、パンチルト動作への拡張も可能である。

3. 撮影画像数の指定可能な超解像処理制御系

撮影画像の枚数を指定可能な超解像処理制御系を **Fig. 1** に示す。雲台制御系に速度拘束を設定し、その拘束を満たす動作を実現するリファレンスガバナを付加する。この改良により、制御系は、指定した枚数 N の画像の取得を保証しながら

* (株) 椿本チエイン埼玉工場 飯能市新光 20

** 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科
生駒市高山町 8916-5

* Tsubakimoto Chain Corporation, 20 Shinko, Hanno

** Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, 8916-5 Takayama-cho, Ikoma
(Received March 21, 2012)
(Revised April 20, 2012)

Fig. 1 Configuration of the proposed super-resolution process control system

ら、目標値追従や速応性などの制御仕様を可能な限り維持できるようにする。数式の導出などは、文献 4) を参照のこと。

3.1 超解像処理系

超解像処理系は、得られた雲台の角度 θ [rad], 角速度 $\dot{\theta}$ [rad/sec], および複数枚の撮影画像 Y_ℓ を用いて、高解像度画像 X を生成する⁴⁾。超解像処理は、各画像間の関係式

$$Y_\ell = W_\ell X + n_\ell \quad \ell \in \{1, \dots, k, \dots, N\} \quad (2)$$

に基づく¹⁾。ただし、 $W_\ell := D_\ell B_\ell M_\ell$ は、画像 X から画像 Y_ℓ までの変換行列、 n_ℓ は、ガウシアンノイズ、 D_ℓ は、ダウンサンプリングを表わす行列、 M_ℓ は、位置ずれを表わす行列、 B_ℓ はブレを表わす行列である。ここで、雲台とカメラのサンプリングと撮影周期を、それぞれ、 T_s , T_c [sec] とし、 $T_c = \beta T_s$ (β は、正の整数) を満たすと仮定する。このとき、 N 枚の撮影画像 $\{Y_1, \dots, Y_N\}$ に対応する雲台の状態情報は、 $\{x(t_1), \dots, x(t_1 + \beta(N-1))\}$ となる。ただし、 t_1 は、画像 Y_1 の撮影時刻に関するステップ数である。

(2) 式における各行列 M_ℓ , B_ℓ は、雲台の角度 $\theta(t_\ell)$, 角速度 $\dot{\theta}(t_\ell)$ を用いた代数演算により導出でき⁴⁾、画像 X の生成には、MAP(Maximum A Posteriori) 推定を用いる。これは、(2) 式とベイズ推定に基づき、 N 枚の撮影画像が与えられたときの画像 X に対する事後確率を最大化することで、 X を推定する方法である⁶⁾。MAP 推定における最大化問題は、

$$\min_X \sum_{\ell=1}^N \|Y_\ell - D_\ell B_\ell(\hat{\theta}) M_\ell(\theta) X\|^2 + \gamma \|FX\|^2$$

と表わされ、二次計画問題の解として推定画像 X を求める。ただし、 F はハイパスフィルタを表わす行列、 $\|\cdot\|$ は l_2 ノルム、 γ は重み係数を表わす。

3.2 制御系の改良

まず、指定数 N の撮影画像を取得するための必要条件を速度拘束に関係づける。カメラと被写体間の幾何学的関係 (Fig. 2) において、カメラと被写体間の距離を L_1 [m], カメラの視野範囲を L_2 [m], 基準画像 Y_k から ℓ 枚目の画像 Y_ℓ までの角度差を $\Delta\theta$ [rad] とする。雲台の回転方向を時計回りとする。このとき、基準画像 Y_k から画像 Y_ℓ までの位置ずれ量 ϕ_m^ℓ [pixel] は、 $\phi_m^\ell = \frac{hL_1}{L_2} \sin \Delta\theta$ と表わされる。ただし、 h [pixel] は、カメラの水平方向の有効画素数を表わす。なお、投影面上での画像歪みによる位置ずれへの影響が無視できるとし、 $\Delta\theta$ は、 $\sin \Delta\theta \approx \tan \Delta\theta$ を満たすと仮定する。

Fig. 2 Geometric relationship

雲台の角速度が十分に推定できている $\hat{\theta} = \dot{\theta}$ と仮定する。このとき、基準画像 Y_k から画像 Y_N までの位置ずれ量は、 $\phi_m^N = \frac{hL_1}{L_2} \sin \left((N-k)T_c \hat{\theta} \right) = n(1-\rho)$ となる。ただし、 ρ は、基準画像 Y_k に対する観測画像 Y_N の重複率 (横方向) を表わす ($0 \leq \rho \leq 1$)。よって、雲台の角速度の上限値 v_{max} [rad/sec] は、 $v_{max} = \frac{1}{\zeta T_c} \sin^{-1} \left(\frac{n(1-\rho)L_2}{hL_1} \right)$ と表わされる。ただし、 $\zeta = k-1$ (N : 奇数), $\zeta = k$ (N : 偶数) とする。以上より、基準画像 Y_k と N 枚目の取得画像 Y_N との共通領域 (の割合 ρ) を指定することで、カメラの回転速度に関する拘束条件がつぎのように記述される。

$$-v_{max} \leq \hat{\theta}(t) \leq v_{max} \quad (3)$$

速度拘束 (3) を破るとき、取得画像数は N を下回る。そこで、速度拘束付きの雲台制御系を拘束系と捉えて、リファレンスガバナを導入する。リファレンスガバナは、目標値 w と雲台の状態情報 θ と $\dot{\theta}$ を用いて、速度拘束を満たす動作を実現する目標値 r を生成する (Fig. 1)。目標値整形は、二次計画問題をオンラインで解くことが求められるが、リアルタイム (T_s 周期内での) 計算が困難となる。そこで、本稿では、複数周期ごとに参照値を整形する、ブロッキングを用いたリファレンスガバナを採用する⁵⁾。

ブロッキング数を ν (正整数) とし、サンプリング周期 νT_s の閉ループ系をつぎのように書き表わす。 $x_c(\nu(i+1)) = \tilde{A}x_c(\nu i) + \tilde{B}(B_\nu r)[i]$, $y(\nu i) = C_c x_c(\nu i)$, $(B_\nu r)[i] = \tilde{C}x_c(\nu i)$ 。ここで、 i は、ステップ数、 $(B_\nu r)[i]$ は、目標値 r をブロッキングしたものであり、 $(B_\nu r)[i]^T = [r(i)^T, r(i+1)^T, \dots, r(i+\nu-1)^T]^T = [r_0^T, r_0^T, \dots, r_0^T]^T$ と表わされ、 ν サンプル間では、同一値 r_0 を保持することになる。同様に、 $(B_\nu z)[i]$ は、拘束を課す状態 $z = \dot{\theta}$ に対応した行列である。また、 $\tilde{A} = A_c^\nu$, $\tilde{B} = [A_c^{\nu-1}B \ A_c^{\nu-2}B \ \dots \ A_c B \ B_c]$, $\tilde{C} = [\tilde{C}_c^T \ (\tilde{C}_c A_c)^T \ (\tilde{C}_c A_c^2)^T \ \dots \ (\tilde{C}_c A_c^{\nu-1})^T]^T$ であり、 A_c, B_c, C_c, x_c は、それぞれ、閉ループ系のダイナミクスを表わす行列と状態である。また、 $\tilde{C}_c$ は、 $z(t) = \tilde{C}_c x_c(t)$ を満たす行列である。

リファレンスガバナは、目標値 $(B_\nu r)[i]$ を決定変数とする二次計画問題として定式化でき、得られる整形入力は、無限時刻先まで速度拘束 (3) の達成を保証する。詳細は、文献 5)

を参照のこと．なお，変数のブロッキングによる目標値整形は，雲台の制御周期と異なるので，改良後の制御系は，雲台の制御周期が T_s ，リファレンスガバナの整形更新周期が νT_s となるマルチサンプリング周期系として実現される．

4. 実機検証

本章では，超解像処理制御系 (Fig. 1) を実装し，指定した枚数の撮影画像を取得できること，また，撮影画像の枚数が増加することによって超解像処理結果が良くなることを検証する．実験における各パラメータの設定は，以下のとおりである．制御対象 (1) の各行列は，

$$A = \begin{bmatrix} 0.9994 & 0.0092 \\ -0.1180 & 0.8473 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.0004 \\ 0.0839 \end{bmatrix}, C = [1, 0]$$

であり， $w = 0.7 \text{ rad}$ ， $k_p = 0.8$ ， $k_i = 0.9$ ， $T_s = 0.01 \text{ sec}$ ， $L = [0.7467 \ 9.2021]^T$ とした．また，超解像処理に関しては， $L_1 = 0.6$ ， $L_2 = 0.347 \text{ m}$ ， $h = 640 \text{ pixel}$ ， $T_c = 0.02 \text{ sec}$ ，カメラの露光時間を 0.01 sec とした．撮影画像 Y_ℓ のサイズと倍率を $m = n = 50 \text{ pixel}$ ， $\alpha = 2$ とした．

実機実験は，解像度チャートの一部を被写体とし，従来法⁴⁾ および提案法を用いて実施した．Fig. 3 に，それぞれの場合における角度と角速度の時間応答を示す．従来法では，同じ領域を撮影した画像は 9 枚となり，基準画像を Y_5 とした．一方，提案法では， $N = 17$ ， $\rho = 0.4$ とし，角速度の上限値を $v_{max} = 0.17 \text{ rad/sec}$ と設定し，リファレンスガバナを付加した結果，指定どおり 17 枚の画像が得られ，基準画像は， Y_9 となった．また，角度の時間応答を示す Fig. 3(a) から，提案法では，速度拘束を考慮したことによる応答の劣化が見られる．なお，リファレンスガバナの実装では，リアルタイム性を考慮し， $\nu = 28$ とした．これは，28 ステップごとに 28 ステップ分の目標値 r が整形されることを意味する．つぎに，従来法における超解像処理結果と基準画像 Y_5 を Fig. 4 に，提案法における結果と基準画像 Y_9 を Fig. 5 にそれぞれ示す．ただし，Fig. 4(b) では， $\gamma = 0.05$ ，Fig. 5(b) では， $\gamma = 0.08$ である．得られた高解像度画像 Fig. 4(b) および Fig. 5(b) の比較により，画像の枚数を指定しない従来法に比べ，より鮮明になっていることが確認できる．これは，速度拘束を考慮した雲台の制御系により，指定の画像数を確保したうえで超解像処理ができていることを表わしている．また，それと同時

Fig. 3 Comparison between the previous⁴⁾ and proposed methods in angle and velocity responses

Fig. 4 Comparison between the captured image Y_5 and the super-resolution result by the previous⁴⁾ method

Fig. 5 Comparison between the captured image Y_9 and the super-resolution result by the proposed method

に，従来法および提案法の実験結果から，構成画像の鮮明さおよび制御系の即応性に関するトレードオフが確認できる．

5. おわりに

本稿では，速度拘束を有する雲台制御系を構築し，撮影画像の枚数が指定可能な超解像処理制御系を提案した．また，実機検証では，従来法に比べて提案法が超解像化において有効であることを確認した．これにより，ある種制御仕様によって雲台の動作が速くなる場合に起きる超解像結果の劣化を回避できるようになった．今後は，パンチルト動作への拡張や $\sin \Delta\theta \approx \tan \Delta\theta$ の仮定が各行列 $\mathcal{M}_\ell(\theta)$ ， $\mathcal{B}_\ell(\dot{\theta})$ の生成に与える影響などを調べるなどが挙げられる．

参考文献

- 1) S. Park, M. Park and M. Kang: Super-resolution image reconstruction: A technical overview, *IEEE Signal Processing Magazine*, **20**-3, 21/36 (2003)
- 2) Y. Li, D. Dai and L. Shen: Multiframe super-resolution reconstruction using sparse directional regularization, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, **20**-7, 945/956 (2010)
- 3) Y. He, K.H. Yap, L. Chen and L.P. Chau: A soft map framework for blind super-resolution image reconstruction, *Image and Vision Computing*, **27**-4, 364/373 (2009)
- 4) K. Kogiso and S. Onishi: Super-resolution image reconstruction using state information of a motorized head, *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, **8**-4 (2013) (to be published)
- 5) 小木曾，平田：変数のブロッキングを用いて表現される拘束システムに対するリファレンスガバナの構成法，計測自動制御学会論文集，**41**-1, 88/90 (2005)
- 6) O. Scherzer, M. Grasmair, H. Grossauer, M. Hltnmeier and et al.: *Variational Methods in Imaging*, Springer (2009)