解説

マルチレートサンプリング制御とロボットへの応用

Application of Multirate Sampling Control to Robot Manipulator

藤 本 博 志* *横浜国立大学大学院工学研究院

Hiroshi Fujimoto* *Yokohama National University

1. はじめに

一般にデジタル制御系では、図 1 に示すように、参照値 $r(t)$ および出力 $y(t)$ の二つのサンプラ S と制御入力 $u(t)$ のホールド $\mathcal{H}$ が存在し、それぞれの周期を T_r, T_y, T_u とすると、合計三つの時間周期が存在する。さらに多入出力系の制御対象を考えると、より数多くの時間周期が混在することになる。一般に制御入力の周期 T_u は、アクチュエータや D/A 変換器の速度、もしくは CPU の演算速度により決まり、出力の検出周期 T_y は、センサや A/D 変換器の速度により決定される。実際の制御系においては、 T_u と T_y のどちらか、あるいは両方に制限を持っていることが多い。そこで、従来型のデジタル制御系では、理論と実装の簡単化のために、周期 T_y と T_u の長いほうに合わせて、これら三つの周期を等しく構成するのが一般的である。

これに対して、より高性能な制御を実現するために、これらの周期を敢えて異なる値に設定するマルチレートサンプリング制御系が研究され、実際にハードディスク装置 [1] ~ [3] や光ディスク装置 [4]、位置決めステージ [5] に実用されつつある。また、特にモーションコントロールの分野において、新たな試みも研究されている [6] [7]。過去の理論的な研究成果に関しては、すでに解説記事が存在するので [8] [9]、本稿ではそれを実際にロボットのビジュアルサーボに適用した筆者らの最近の研究 [10] [11] を紹介する。

ビジュアルサーボの研究動向に関しては、文献 [12] や本特集号の橋本氏の解説に譲るが、本解説では視覚センサの遅れについて議論を進めることにする。一般的な CCD カメラのサンプリング周期は 33 [ms]、ジョイントサーボ系のサンプリング周期は 1 [ms] 程度とこれらの間には大きな差がある。デジタル制御系では通常、サンプリング周期を長いものに合わせて制御系を構成するが、サンプリング周期をカメラのサンプリング周期に合わせると、ジョイントサーボに必要なサンプリング周期を確保することができ

図 1 Two-degree-of-freedom control system

ない。

この問題に対し、サンプリング周期が 1 [ms] と非常に高速な画像処理を行うことができるビジョンチップを用いる手法 [13] があるが、本稿では特別なハードウェアを用いることなくマルチレート制御理論に基づくアプローチにより、この問題に取り組んだ研究を解説する。

2. マルチレート制御系の設計

2.1 マルチレートサンプリング制御による制御対象の離散化

図 2 に示すように、出力信号のサンプリング周期 T_y の間に制御入力を短い周期 T_u で複数回切り換えるマルチレート制御系を考える。簡単化のため切り替える回数 N は制御対象の次数 n に等しいものとする[†]。

単入出力 n 次の連続時間制御対象

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + b_c u(t) \quad (1)$$

$$y(t) = c_c x(t) \quad (2)$$

を制御周期 T_u で離散化した状態方程式は

$$x[k+1] = A_s x[k] + b_s u[k] \quad (3)$$

となる。ただし、 $x[k] = x(kT_u)$ であり

$$A_s := e^{A_c T_u}, b_s := \int_0^{T_u} e^{A_c \tau} b_c d\tau \quad (4)$$

とする。ここで、図 2 において、 $t = iT_y = kT_u$ から

[†] $N \neq n$ のより一般的な場合に関しては、文献 [10] [14] などを参照。

原稿受付 2009 年 2 月 28 日

キーワード: Multirate Control, Visual Servoing, Intersample Disturbance Rejection

* 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5

* Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa

図 2 Multirate hold

$t = (i + 1)T_y = (k + n)T_u$ への状態変数の遷移を考える
と，離散時間制御対象 $P[z]$ は

$$\mathbf{x}[i+1] = \mathbf{A}\mathbf{x}[i] + \mathbf{B}u[i] \quad (5)$$

$$y[i] = \mathbf{c} \mathbf{x}[i] \quad (6)$$

と表せる. ただし, $x[i] = x(iT_y)$ であり, $A, B, c, u[i]$ はそれぞれ以下のように選ぶものとする.

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_s^n \quad (7)$$

$$B = \begin{bmatrix} A_s^{n-1}b_s, A_s^{n-2}b_s, \dots, b_s \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{c} = \mathbf{c}_c \quad (9)$$

$$\mathbf{u}[i] := \left[\mathbf{u}[k], \mathbf{u}[k+1], \dots, \mathbf{u}[k+n-1] \right]^T \quad (10)$$

2.2 Perfect Tracking Control (PTC) 法

制御対象を目標軌道に追従させる追従制御系を，デジタル制御により実現する場合には，零次ホールドを用いて離散化するときには生じる制御対象の不安定零点により [15]，目標軌道に誤差なく追従する制御系を構成することは不可能であった [16]．

これに対して、筆者らは文献 [17] で、 $T_r = nT_u$ とするマルチレートフィードフォワード制御を導入すれば、ノミナルプラントに対してサンプル周期 T_r ごとに目標軌道に対する追従誤差を零にする完全追従制御系が構成できることを明らかにした。

本節では、 $T_y = T_r$ とする場合における完全追従制御 (PTC) の設計を説明する。式 (5) は以下のように変形することができる。

$$\mathbf{u}[i] = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{I} - z^{-1}\mathbf{A})\mathbf{x}[i+1] \quad (11)$$

式(3)の制御対象が可制御であれば, 行列 B の正則性は保証され, さらに式(11)のすべての極は原点にあることから安定な逆系であることが分かる. また, $r[i]$ として, 制御対象の状態変数に対する目標軌道の予見値 $r[i] = x_d[i+1]$ を与える. よって, 式(11)よりフィードフォワード制御

图 3 PTC 控制器带信号发生器

通りの制御手法を考えることができる[19]．フィードバック的補償法では，図3のスイッチは常にオン状態とする．図4のシグナルジェネレータは次式で表現できる．

$$r[i] = -\frac{z}{z^{N_d}-1}y[i] \quad (14)$$

ただし，整数 N_d は外乱周期 T_d とサンプリング周期 T_y の比 ($N_d := T_d/T_y$) とする．式(13)，式(14)より閉ループ系は

$$y[i] = -\frac{z^{N_d}-1}{z^{N_d}}d_2[i] \quad (15)$$

となり， $d[i] = (z^{N_d}-1)^{-1}$ とモデル化できる周期的外乱は，定常状態においてサンプル点上で抑圧される．

さらに本手法では，定常状態において1外乱周期 T_d だけ出力 $y[i]$ を学習し，その後スイッチを常にオフとしても，その後外乱が変動しなければ，サンプル点上において誤差を零にし続けることができる．従来の繰り返し学習制御系では，周期外乱の内部モデルが系のロバスト安定性を劣化させる問題点があったが，このフィードフォワード的補償法は，その問題点を解決することができる．

3. ビジュアルサーボ系への応用

6軸マニピュレータのハンドにカメラを取り付け，カメラから得られた画像情報を基に，特徴ベースビジュアルサーボにより目標物体にトラッキングすることを考える．画像情報が得られない33[ms]のサンプル点間の物体位置を推定するために，等速直線運動・等加速度運動など運動モデ

図5 Visual servo system

ルが必要となるが[10]，ここでは周期的運動モデルを採用する[11]．

3.1 ビジュアルサーボ系の設計

図5に，提案するビジュアルサーボ系を示す[10][11]． $v_c = \dot{x}_c := [T_x, T_y, T_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ は，カメラ座標系におけるカメラ速度であり，外乱オブザーバに基づくロバストな作業空間制御系により，運動学・動力学上の非線形性を補償している．この制御系は，ジョイントサーボ系の周期1[ms]で制御しているため，連続時間線形系 $P_c(s)$ と近似できる． x_o は運動物体の位置・姿勢であり， ξ は八次元の画像特徴量， T_D は画像処理に必要なむだ時間， J_n は画像ヤコビアンである．この制御系により，RPTC法が適用可能となる．図5の $C[z]$ は図3の制御器全体に対応する．

3.2 シミュレーション

目標物体が四角形周期運動をする場合に対するシミュレーションを行った．図6(a)に，画像平面上における物体の初期位置と目標位置を示す．マニピュレータの初期姿勢は，Z-Y-Zオイラーアングルで $(\alpha, \beta, \gamma) = (0.08, \pi/2+0.03, -0.17)$ と目標物体に対して敢えて角度を持たせているため，初期画像は歪んでいる．図6(b)に特徴量の追従誤差を示す．スイッチがオフのとき，フィードバックコントローラ $C_2[z]$ は，物体の運動モデルを持たないため，大きな追従誤差を生じている．その後，スイッチをオンとすることにより，シグナルジェネレータより追従誤差を打ち消す位置指令値と速度指令値が生成され，PTCによりサンプル点上で追従誤差が零，つまり目標物体の運動に対してカメラ位置がサンプル点上で完全追従する．また，図6(c)に $t = 30 \sim 40$ [s]におけるカメラ位置と目標物体の運動の軌跡を示す．運動物体に対しカメラ位置が追従しているのが確認できる．

3.3 実験

本実験は，図7に示す安川電機の6軸マニピュレータMOTOMANを使用した．画像処理はWindows(CPU: Pentium4 3.20[GHz])において画像処理ソフトHalcon7.0を用いて行い，ジョイントサーボ系とビジュアルサーボ系の処理をRT-Linux(CPU: Pentium4 2.00[GHz])で行っ

図6 Simulation result

図 7 6 DOF manipulator (MOTOMAN)

図 8 Desired and feature points in experiment

た．この 2 台の PC 間の通信は，ソケット通信で行っている．カメラの画像解像度は 640×480 [pixel] とした．

本実験においては，目標物体ではなく目標特徴量 ξ^{ref} を四角形周期運動させた．図 8 に提案法の目標特徴量 ξ^{ref} と特徴量 ξ の x 成分を示す．このとき RPTC は，1 外乱周期のみスイッチをオンとするフィードフォワードの補償法とした．フィードバックコントローラ $C_2[z]$ は PID 制御器のためスイッチをオンにするまで， ξ は ξ^{ref} に追従できないが，オンにした後は PTC の動きにより良好に追従していることが分かる．

4. お わ り に

本稿では，マルチレートサンプリング制御を用いた完全追従制御法と繰り返し学習制御法を説明し，6 軸ロボットのビジュアルサーボに適用した結果を紹介した．工場内の産業用ロボットのように反復動作を行わせる場合には，目標画像特徴量が周期的になるため，本稿で紹介した手法は有効であると考えられる．

また，目標物体とカメラの距離 z が大きく変動する場合には，画像ヤコビアンに用いる z を固定した場合に，ビジュアルサーボ系が不安定化することがある．文献 [20] では，目標物体あるいはカメラの運動を利用して，単カメラの場合においても z をリアルタイムに推定する手法を提案し，これをマルチレートビジュアルサーボ系に適用している．

参 考 文 献

- [1] 山口，平田，藤本：ナノスケールサーボ制御—高速高精度に位置を決める技術—．東京電機大学出版局，2007．
- [2] 平田：“磁気ディスク装置のシングルレート・マルチレートサンプリング制御”，計測と制御，vol.41, no.6, pp.399–405, 2002．
- [3] 藤本，堀，山口：“マルチレートフィードフォワード制御によるモーションコントロール—磁気ディスク装置のシーク制御への応用—”，計測と制御，vol.39, no.10, pp.639–642, 2000．
- [4] 渋谷，吉田，大石，宮崎，小出，徳丸：“高速光ディスク装置のための高性能エラー予測型ロバストトラッキング制御系”，電学論，vol.128-D, no.6, pp.785–792, 2008．
- [5] 藤本：“マルチレート制御によるナノスケールサーボ”，システム/情報/制御，vol.53, no.6 掲載予定，2009．
- [6] 水落，辻俊明，大西：“マルチレートサンプリング手法を用いた加速度制御系の実現”，電学論，vol.126-D, no.3, pp.261–268, 2006．
- [7] 島田，草刈：“パラレル機構型アクティブビジョンのためのマルチレート外乱オブザーバ制御系の設計”，計測自動制御学会論文集，vol.44, no.1, pp.18–25, 2008．
- [8] 萩原，荒木：“時変型デジタル制御装置”，計測と制御，vol.27, no.12, pp.1071–1077, 1988．
- [9] 山本，藤岡，原：“サンプリング制御理論—VI—，—デジタル信号処理への応用—”，システム/情報/制御，vol.44, no.6, pp.336–343, 2000．
- [10] 藤本，堀：“マルチレート制御とむだ時間補償に基づくビジュアルサーボ”，日本ロボット学会誌，vol.22, no.6, pp.780–787, 2004．
- [11] 笹嶋，藤本：“高速運動物体に対する 6 自由度マルチレートビジュアルサーボ”，日本ロボット学会誌，vol.25, no.6, pp.1014–1020, 2007．
- [12] 橋本：“ビジュアルサーボにおける予測と感度”，計測と制御，vol.40, no.9, pp.630–635, 2001．
- [13] 中坊，石川：“1ms 高速ビジョンを用いたビジュアルサーボイング”，計測と制御，vol.40, no.9, pp.636–640, 2001．
- [14] H. Fujimoto: General Framework of Multirate Sampling Control and Applications to Motion Control Systems, PhD thesis, The University of Tokyo (2001). <http://www.dnj.ynu.ac.jp/~hfuj/>．
- [15] K. J. Åström, P. Hangander and J. Sternby: “Zeros of sampled system,” Automatica, vol.20, no.1, pp.31–38, 1984．
- [16] M. Tomizuka: “Zero phase error tracking algorithm for digital control,” ASME, J. Dynam. Syst., Measur., and Contr., vol.109, pp.65–68, 1987．
- [17] 藤本，堀，河村：“マルチレートフィードフォワード制御を用いた完全追従制御”，計測自動制御学会論文集，vol.36, no.9, pp.766–772, 2000．
- [18] 島田，篠原：“弾性関節を有するマニピュレータのマルチレート完全追従制御”，計測自動制御学会論文集，vol.42, no.2, pp.139–146, 2006．
- [19] 藤本，川上，近藤：“スイッチング機構に基づく磁気ディスク装置の繰り返し制御：提案する 2 種類のマルチレート制御系の比較検討”，計測自動制御学会論文集，vol.41, no.8, pp.645–651, 2005．
- [20] 後藤，藤本：“リアルタイム距離同定を用いた飛行物体に対するビジュアルサーボ”，第 26 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM，3D2-05, 2008．

藤本博志 (Hiroshi Fujimoto)

2001 年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了．博士 (工学)．長岡技術科学大学助手，米国 Purdue 大学客員研究員，横浜国立大学工学講師，助教授を経て，2007 年より同准教授．制御工学，モーションコントロールに関する研究に従事．2001 年 IEEE Trans. on IE 最優秀論文賞などを受賞．電気学会，計測自動制御学会，IEEE，自動車技術会の会員．（日本ロボット学会正会員）