

制御通信システムのクロスレイヤ設計に関する研究

代表研究者 林 和 則 京都大学 大学院情報学研究科 准教授
共同研究者 永 原 正 章 京都大学 大学院情報学研究科 講師

1 はじめに

ロボット、防災、交通システム、宇宙開発、医療、エネルギーシステムなどのシステム制御における通信技術は今後の産業に欠かせない基幹技術であり、制御のための通信（制御通信）技術の重要性は年々高まっている。従来の人を対象とした通信システムでは、アプリケーション層における品質や満足度を数学的に記述することは困難であるため、多くの場合それ以下の層の特性のみを考慮して通信システムの設計が行われてきた。これに対し、機械を対象とした制御通信では、制御システムがアプリケーション層に相当し、その特性をシステム制御の理論によって数学的に記述することができる。このため、制御通信においては、アプリケーション層まで含めたクロスレイヤ設計が原理的には可能であると考えられる。

制御通信に関する研究では、制御系設計の立場からパケットロスや伝送遅延、伝送速度などの通信路制約がある制御の問題として検討されており、これまでに、パケットロスや伝送遅延の影響、安定化のための条件などが明らかにされている[1]。また、パケットロスに対してロバスト性を保証するためにスパースなパケット化予測制御[2]なども提案されている。一方、通信系設計の立場からは、状態予測に基づく適応符号化によって通信路誤りの低減と制御性能の向上をはかる手法[3-5]が検討されている。さらに、制御レイヤの情報であるオブザーバでの状態予測の結果を利用して、状態フィードバックの通信における信号検出特性を改善する手法が提案されている[6]。また、複数機器の制御では、制御の知識として協調動作を行っているという知識を利用したダイバシティによる制御品質の向上[7]なども検討されている。一方で、制御レイヤからみた通信レイヤはブラックボックスとして取り扱われることがほとんどであり、受信パケットに通信路誤りが1ビットでも検出されるとそのパケットは全て破棄するという処理が広く用いられている。しかしながら、通信路誤りは典型的にはパケットのごく一部の情報ビットに対して生じる。また、制御通信においては、古い状態量や制御量の情報が価値をもたないことから分かるように、「情報の価値」が時間とともに低下してしまうという特徴がある。このため、受信パケットのうち誤りの生じていない情報を特定し、その情報のみを用いて制御を行うことでより新しい情報を活用することができれば、さらなる制御性能の改善が期待できる[10]。

本研究では、離散時間の無線フィードバック制御を対象とし、状態フィードバックによって得られた新しい情報を可能な限り破棄することなく積極的に活用するという観点から、情報ビットの誤り位置と重要度を考慮した新しい状態予測法を提案する。特に、制御対象から制御器へのフィードバック通信に着目し、ベクトルで表現される観測量のそれぞれの要素について誤り検出符号を用いて誤りをチェックすることで、正しく受信できた観測量のみを用いて制御量の計算に使用するための状態予測を行う手法を提案する。また、量子化された観測量の最上位ビットと最下位ビットの制御レイヤにおける重要度の違いを考慮し、下位ビットの誤りを無視して状態予測を行うことも検討する。倒立振子を題材に提案法を用いたときの特性を評価し、従来法の特性と比較することで、提案方式によって通信路誤りによる影響を低減でき、制御品質を大きく改善できることを明らかにする。

2 システムモデル

本研究で用いるシステムモデルは、図1に示すような、制御対象、センサ、オブザーバ（状態予測器）、LQG（Linear Quadratic Gaussian）制御器からなる離散時間無線フィードバック制御モデルである。制御対象は、その状態空間表現が次式で表現される線形時不変（Linear Time Invariant, LTI）システムであるとする。

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{A}\mathbf{x}[k] + \mathbf{B}\hat{\mathbf{u}}[k] + \mathbf{w}[k] \quad (1)$$

ここで、

時刻： kT_s ($k = 0, 1, \dots$)
サンプリング周期[s]： T_s
制御対象の状態量： $\mathbf{x}[k] \in \mathbb{R}^{N_x}$

ここで、 $\mathbf{s}_i[k]$ は $y_i^d[k]$ を変調したベクトルである。たとえば、BPSK (Binary Phase-Shift Keying) 変調を用いたとき、 $\mathbf{s}[k]$ は LN_y 次元ベクトルとなる。また、受信信号ベクトル $\mathbf{r}[k]$ は通信路雑音を $\mathbf{n}[k]$ として

$$\mathbf{r}[k] = \mathbf{s}[k] + \mathbf{n}[k] \quad (6)$$

で表されるものとする。ここで、 $\mathbf{n}[k]$ の各要素は独立で、電力密度スペクトルが $N_0/2$ の加法性白色ガウス雑音である。

3 従来のアプローチ

従来法[6]における制御器側の受信機ではまず、ML (Maximum Likelihood, ML) 判定を用いて信号検出を行う。ML 判定では、次式を用いて $\hat{\mathbf{y}}[k]$ の推定値 $\hat{\mathbf{y}}^d[k]$ の各要素 $\hat{y}_1^d, \dots, \hat{y}_{N_y}^d$ を決定する。

$$\begin{aligned} \hat{y}_n^d[k] &= \arg \max_{y_n^d[k]} P(y_n^d[k] | \mathbf{r}_n[k]) \\ &= \arg \max_{y_n^d[k] \equiv \mathbf{s}_n[k]} \left[-\frac{1}{N_0} \|\mathbf{r}_n[k] - \mathbf{s}_n[k]\|^2 \right] \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{s}_n[k]$ は $y_n^d[k]$ と等価な情報 (式中には記号 \equiv で表記) である。判定結果の $\hat{\mathbf{y}}^d[k]$ に誤りがあるかどうか理想的に分かるものとし、誤りがないとき $\hat{\mathbf{y}}^d[k]$ は $\hat{\mathbf{y}}[k]$ に復号されオブザーバに入力される。誤りが1ビットでも存在する場合は、次に述べる制御レイヤの情報を利用したML判定を行う。この判定法では、次の事後確率最大化に基づいて判定を行う。

$$\begin{aligned} \hat{y}_n^d[k] &= \arg \max_{y_n^d[k]} P(y_n^d[k] | \mathbf{r}_n[k], \tilde{y}_n[k]) \\ &\approx \arg \max_{y_n^d[k] \equiv \mathbf{s}_n[k], y_n^a[k]} \left[-\frac{1}{N_0} \|\mathbf{r}_n[k] - \mathbf{s}_n[k]\|^2 - \frac{1}{2\sigma_n^2[k]} (y_n^a[k] - \tilde{y}_n[k])^2 \right] \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $\hat{y}_n^d[k]$ をアナログ値に復号したものを $\hat{y}_n^a[k]$ としている。また、 $\sigma_n^2[k]$ はすべてカルマンフィルタ内のゲイン計算から得ることができる。式(8)による判定により復調された $\hat{\mathbf{y}}^d[k]$ に誤りあるかどうか理想的にすべて正しく分かるという仮定のもと判定し、正しく受信していれば復号した $\hat{\mathbf{y}}[k]$ をオブザーバに入力する。誤りが1ビットでも存在する場合は、オブザーバに情報を入力せずに破棄するものとする。

また、オブザーバにおける状態予測には、文献[1]のペケットロスが生じるネットワーク制御系における線形最小分散推定 (カルマンフィルタ) を文献[6]に基づき適用する。時刻 $(k+1)T_s$ における状態量の予測値を $\tilde{\mathbf{x}}[k+1]$ と表現すると、以下のように、時刻 kT_s における観測量 $\hat{\mathbf{y}}[k]$ および復号された制御量 $\mathbf{u}^a[k]$ によるオブザーバゲイン $\mathbf{L}[k]$ の計算、予測値 $\tilde{\mathbf{x}}[k]$ の更新、状態空間モデルに基づく $\tilde{\mathbf{x}}[k+1]$ の計算が行われる。

(Observer gain)

$$\mathbf{L}[k] = \mathbf{E}[k] \mathbf{C}^T (\mathbf{C} \mathbf{E}[k] \mathbf{C}^T + \mathbf{V})^{-1} \quad (9)$$

(Measurement update)

$$\tilde{\mathbf{x}}_+[k] = \tilde{\mathbf{x}}[k] + \beta_1[k] \mathbf{L}[k] (\hat{\mathbf{y}}[k] - \mathbf{C} \tilde{\mathbf{x}}[k]) \quad (10)$$

$$\mathbf{E}_+[k] = \mathbf{E}[k] - \beta_1[k] \mathbf{L}[k] \mathbf{C} \mathbf{E}[k] \quad (11)$$

(Time update)

$$\tilde{\mathbf{x}}[k+1] = \mathbf{A} \tilde{\mathbf{x}}_+[k] + \mathbf{B} \mathbf{u}^a[k] \quad (12)$$

$$\mathbf{E}[k+1] = \mathbf{A} \mathbf{E}_+[k] \mathbf{A}^T + \mathbf{W} \quad (13)$$

ただし、オブザーバにおいて \mathbf{W} は既知とする。また、状態量の予測誤差を $\mathbf{e}[k] = \mathbf{x}[k] - \tilde{\mathbf{x}}[k]$ とすると、 $\mathbf{E}[k]$ は $\mathbf{e}[k]$ の共分散行列であり、そのトレースはカルマンフィルタによって最小化される。 \mathbf{V} は $\mathbf{y}^d[k]$

に加わる量子化誤差の共分散行列であり, $\beta_1[k]$ は, 受信したデータパケットの通信路誤りの有無により,

$$\beta_1[k] = \begin{cases} 0 & (\text{with error}) \\ 1 & (\text{w/o error}) \end{cases} \quad (14)$$

と定義する.

4 提案法

本研究では, 図2にその手続きのフローチャートを示す制御レイヤの情報を利用した ML 判定受信機によって復調された $\hat{\mathbf{y}}^d[k]$ の誤り判定およびオブザーバへのデータパケット入力の判断基準 (図2の黒塗りの部分における処理) を変更することで, 誤り位置を考慮した制御法を3つ提案する. なお, 現実的には $\hat{\mathbf{y}}^d[k]$ の誤りの検出を行う際, 誤り検出符号などの冗長をデータパケットに付加することによって行う必要があるが, 提案法では従来法に比べ多くの冗長が必要となりパケット誤り率が增大する可能性がある. この影響を考慮するため, 本研究における誤りの検出は, 誤り検出符号を用いて行うものとする.

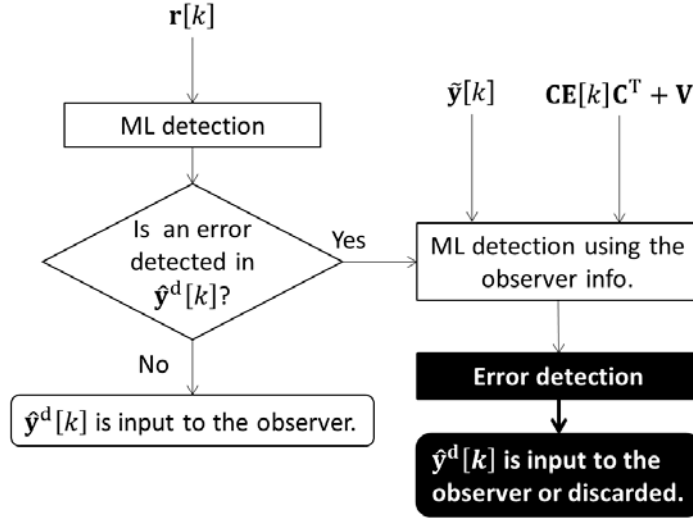


図2: 制御レイヤの情報を用いた受信機の手続きのフローチャート

4-1 誤りが検出されない観測量の要素のみを用いる方法 (提案法1)

送信機側において $y_1^d[k], \dots, y_{N_y}^d[k]$ それぞれに誤り検出符号を付加し, 受信機側において, $\hat{\mathbf{y}}^d[k]$ の各要素についてそれぞれ誤りの検出を行う. 誤りが検出された $\hat{\mathbf{y}}^d[k]$ の要素を破棄し, 誤りが検出されなかった要素のみをオブザーバに入力する. すべての要素において誤りが検出された場合, オブザーバには入力されない. これらの処理は, オブザーバにおいて観測行列 \mathbf{C} および量子化誤差の共分散行列 \mathbf{V} を適応的に選択することに相当する. つまり, オブザーバにおける計算は, $\hat{y}_1^d[k], \dots, \hat{y}_{N_y}^d[k]$ のうち, 誤りが検出された要素に対応する行を $N_y \times N_y$ 単位行列から除いた行列を $\mathbf{D}[k]$ とし,

$$\mathbf{C}'[k] = \mathbf{D}[k]\mathbf{C}, \mathbf{V}'[k] = \mathbf{D}[k]\mathbf{V}\mathbf{D}[k]^T$$

とすると, 式(9), (10), (11)はそれぞれ以下のように書き直せる.

$$\mathbf{L}[k] = \mathbf{E}[k]\mathbf{C}'[k]^T (\mathbf{C}'[k]\mathbf{E}[k]\mathbf{C}'[k]^T + \mathbf{V}'[k])^{-1} \quad (15)$$

$$\tilde{\mathbf{x}}_+[k] = \tilde{\mathbf{x}}[k] + \beta_2[k]\mathbf{L}[k](\mathbf{D}[k]\hat{\mathbf{y}}[k] - \mathbf{C}'[k]\tilde{\mathbf{x}}[k]) \quad (16)$$

$$\mathbf{E}_+[k] = \mathbf{E}[k] - \beta_2[k]\mathbf{L}[k]\mathbf{C}'[k]\mathbf{E}[k] \quad (17)$$

なお, 式(12), (13)はそのまま適用する. また, $\beta_2[k]$ は,

$$\beta_2[k] = \begin{cases} 0 & (\text{all elements are discarded}) \\ 1 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (18)$$

と定義する。

4-2 観測の下位ビットの誤りを無視する方法（提案法2）

$\mathbf{y}^d[k]$ の要素 $y_i^d[k]$ ($i \in \{1, 2, \dots, N_y\}$) の上位 n ($1 \leq n \leq L-1$) ビットを $y_i^{(n)d}[k]$ とする。 $y_1^{(n)d}[k], \dots, y_{N_y}^{(n)d}[k]$ を順番に横に並べることによって作られた $n \times N_y$ 桁の2進数を $n \times N_y$ ビットのデータ列とみなし、これ全体に誤り検出符号を付加する。受信機側では、全ての要素の上位 n ビットのいずれかに誤りがあるか無いかのみを検出することができる。誤りが検出されれば、データパケットを破棄、検出されなければデータパケットをオブザーバに入力する。オブザーバにおける処理は式(9), (10), (11), (12), (13)で表される。

4-3 上位ビットに誤りが検出されない観測の要素のみを用いる方法（提案法3）

送信機側において、 $y_1^{(n)d}[k], \dots, y_{N_y}^{(n)d}[k]$ それぞれに誤り検出符号を付加する。受信機側では、 $\hat{y}_i^{(n)d}[k]$ それぞれについて誤りの検出を行う。誤りの検出された要素は破棄され、誤りの検出されなかった要素のみオブザーバに入力される。すべての要素において誤りが検出された場合、オブザーバには入力されない。簡単のため、すべての i に対して n は等しいものとする。これは、先述の2つの提案法を組み合わせた手法であり、オブザーバにおける処理は式(15), (16), (17), (12), (13)で表される。

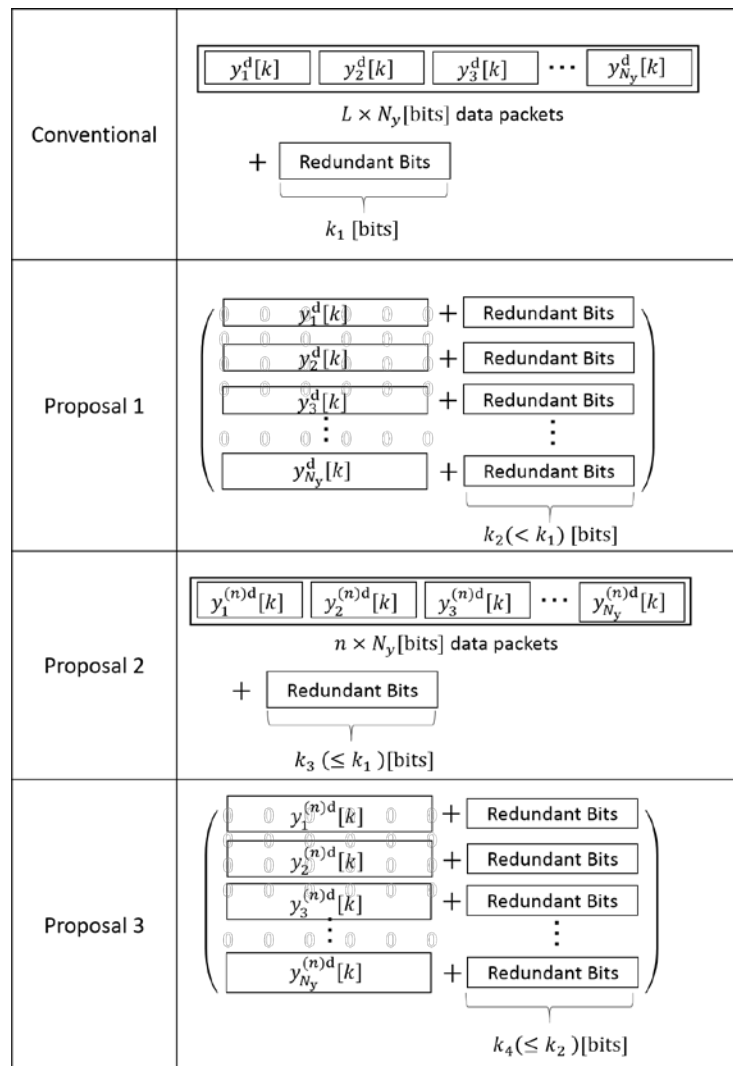


図3：各手法における冗長付加の方法

図3に、従来法および各提案法の冗長付加の模式図を示す。なお、従来法では、制御レイヤの情報を利用したML判定によって復調された $\hat{\mathbf{y}}^d[k]$ に1ビットでも誤りがあればそのパケットは破棄するため、冗長の付加はデータパケット全体に対して行う。

5 特性評価

5-1 諸元

回転倒立振子[9]を題材にして性能評価を行う。変調方式はBPSKとし、実行時間は500[秒]、サンプリング周波数は100[Hz]とする。状態量ベクトル $\mathbf{x}[k]$ は4[次元]とし、その要素 $\phi[k]$, $\theta[k]$, $\dot{\phi}[k]$, $\dot{\theta}[k]$ はそれぞれ振子とアームそれぞれの基準位置からの角度および角速度を表す。観測行列 \mathbf{C} は4次元単位行列とし、 $\mathbf{y}[k](= \mathbf{x}[k])$ の各要素の量子化範囲は、 $\phi[k] \in [-0.1, 0.1]$, $\theta[k] \in [-0.1, 1.7]$, $\dot{\phi}[k] \in [-1.0, 1.0]$, $\dot{\theta}[k] \in [-1.2, 1.2]$ とする。また、各要素は10ビット量子化を行う。誤り検出符号には巡回冗長検出(Cyclic Redundancy Code, CRC)符号[8]を用いる。

以上の条件の下で、

- 従来法** 受信した情報に1ビットでも誤りがあれば破棄する方法
- 提案法1** 誤りが検出されない観測量の要素のみを用いる方法
- 提案法2** 観測量の低位ビットの誤りを無視する方法
- 提案法3** 上位ビットに誤りが検出されない観測量の要素のみを用いる方法

について、性能評価を行う。従来法では全データパケットに対し冗長を11[bits]を付加するものとし、これにより全40 [bits]に対して6 [bits]までの誤りを検出することができる。誤り検出能力を揃えるために、提案法1では各要素にそれぞれ5 [bits]の冗長を付加する。提案法2において、データパケット全体に対して冗長は $n = 1$ のとき4 [bits], $n = 2$ のとき5 [bits], $n \geq 3$ のとき11 [bits]を付加する。提案法3では各要素にそれぞれに、 $n \leq 5$ のとき4 [bits], $n \geq 6$ のとき5 [bits]の冗長を、 n に応じて選択し付加する。

時刻 $t = 0$ [s]における初期値を $\mathbf{x}[0] = \tilde{\mathbf{x}}[0] = \mathbf{0}$, $\mathbf{E}[k] = \mathbf{0}$ とする。1回の試行内において、振り子の角度が $\pm\pi/2$ [rad]の範囲を一度でも越えたら振り子が転倒したと判断する。

性能評価の評価指標として、通信レイヤの品質を評価するために、以下の指標を用いる。

通信品質

- パケット誤り率** 受信した情報が送信した情報と異なる確率の500回の平均。
- パケット破棄率** オブザーバにデータパケットが入力されない確率の500回の平均。

制御品質 通信誤りおよび外乱がない動作を理想的な動作とし、理想的な動作とのアーム角度の二乗平均平方根誤差 (Root Mean Squared Error, RMSE) の500回の平均。

転倒率 転倒する場合も含めて500回の試行を行い、そのうち転倒した回数の割合。

なお、通信品質および制御品質を評価する際に、振り子が転倒したときの試行は含めない。パケット誤り率の計算においては、 $\mathbf{y}^d[k]$ および $\hat{\mathbf{y}}^d[k]$ に冗長を付加した上で比較し、試行時間内でデータの送受信が行われた回数のうち、1ビット以上の誤りが存在する回数の割合を求めている。提案法2、提案法3において、誤り検出を行うビット数を決めるパラメータ n の選択は、各SNRにおいてもっともよい制御品質となる値を選ぶものとする。

5-2 実験結果

図4, 5, 6にそれぞれ通信品質, 制御品質, 転倒率の実験結果のグラフを示す。図4および5の低いSNRの領域においてデータがプロットされていない部分は、振子が全ての試行で転倒したことを意味している。

図4の通信品質の特性結果のグラフにおいて、丸でプロットされている点がパケット誤り率、四角でプロットされている点がパケット破棄率をそれぞれ示している。提案法1および提案法3は従来法より冗長の量が多く、1パケットに含まれる送信シンボル数が多いため、パケット誤り率が従来法に比べて高くなっている。一方、従来法と提案法2ではパケット誤り率とパケット破棄率にあまり差がないのに対して、提案法1および提案法3ではパケット誤り率に比べてパケット破棄率が非常に小さくなっている。以上のことから、提案法1および提案法3を用いることで、誤り検出符号のオーバーヘッドを考慮しても、より新しいフィードバック情報を積極的に活用する効果が十分に得られることが分かる。

次に、図5の制御品質および図6の転倒率について考察する。従来法ではSNRが1[dB]以下では全ての試行で転倒するのに対し、提案法1および提案法2ではSNRが-2[dB]以下で毎回転倒するようになり、提案法3ではSNRが-4[dB]のときでも転倒率は0.64程度となっている。また、いずれの提案法も従来法より制御品質の向上および転倒率の低減が達成されており、特に提案法3を用いることで大幅な特性改善が見られる。なお、図4,6における提案法3の packets 破棄率および転倒率は、SNRが-1[dB]のときよりも-2[dB]のときの方がそれぞれ低い値となっているが、これは各SNRにおけるパラメータ n を制御品質に基づいて最適化しているためである。 n をSNR毎に適応的に選択できない場合には提案法3が利用できないが、そのような場合でも提案法1を用いることで従来法に比べて大きな特性改善が達成できる。

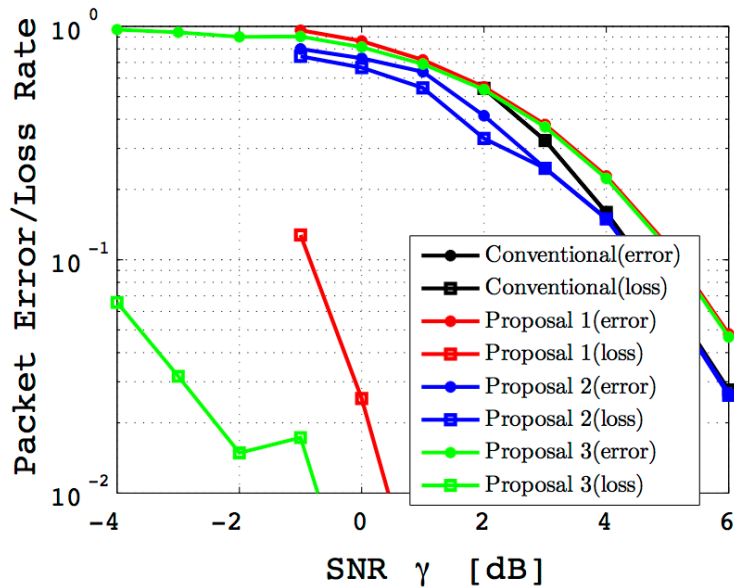


図4：通信品質の評価（パケット誤り率）

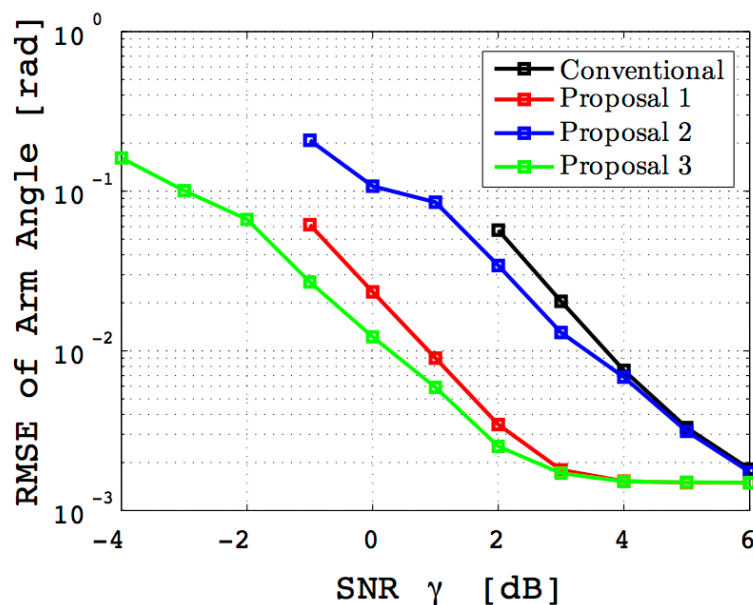


図5：制御性能の評価（アームの誤差）

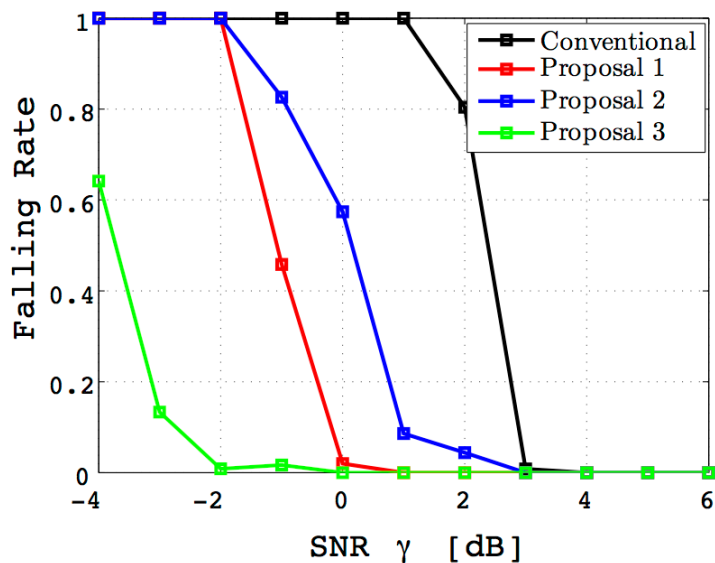


図 6：制御性能の評価（アームの転倒率）

6 むすび

本研究では，離散時間無線フィードバック制御において，状態フィードバックによって得られた新しい観測量を積極的に活用するための方法について検討した．また，提案法では従来法に比べて多くの冗長が必要となりパケット誤り率が増大する可能性があるため，この影響を考慮するために広く用いられている誤り検出符号である CRC 符号を採用した．倒立振子を題材にした実験によって提案法による制御品質を評価し，従来法と比較することで，提案法の有効性を明らかにした．

今後の課題としては，より高度な量子化方法の適用の検討や，提案法に適した誤り検出符号の検討，また，さらに複雑な制御システムにおける特性評価などが挙げられる．

【参考文献】

- [1] L. Schenato, B. Sinopoli, M. Franceschetti, K. Poolla and S. S. Sastry, “Foundations of control and estimation over lossy networks,” Proc. of the IEEE, vol.95, no.1, pp.163-187, Jan. 2007.
- [2] M. Nagahara, D. E. Quevedo and J. Østergaard, “Sparse Packetized Predictive Control for Networked Control over Erasure Channels,” IEEE Trans. on Automatic Control, vol.59, no.7, pp.1899-1905, Jul.2014.
- [3] S. Hattori, K. Kobayashi, H. Okada and M. Katayama, “A Note on Adaptive Coding Scheme for Minimizing Tracking Error in Wireless Feedback Control Systems,” IEEE/SICE Int. Symp. System Integration (SII), pp.867-872, Dec.2013.
- [4] S. Hattori, K. Kobayashi, H. Okada and M. Katayama, “A Note on Adaptive Coding Scheme Based on Control Quality for Wireless Feedback Control Systems,” 2013 IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), Cagliari, pp. 1-6, 2013.
- [5] S. Hattori, K. Kobayashi, H. Okada and M. Katayama, “A Note on Adaptive Coding Scheme for Improvement of Reference Tracking in Wireless Feedback Control Systems,” Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, pp.4438-4443, 2013.

- [6] 小林, 岡田, 片山, “無線フィードバック制御におけるオブザーバの状態予測を利用した最尤判定受信機,” 信学論(A), vol.J96-A, No.11, pp.745-755, Nov.2013.
- [7] T. Kondo, K. Kobayashi, and M. Katayama, “A Wireless Control System with Mutual Use of Control Signals for Cooperative Machines,” IEICE Trans. Fund., vol.E95-A, no.4, pp.697-705, Apr.2012.
- [8] W. W. Peterson and D. T. Brown, “Cyclic Codes for Error Detection,” Proc. of the IRE, pp.228-236, Jan. 1961.
- [9] リアルテック, 回転型倒立振子(RTC05), <http://www7b.biglobe.ne.jp/~realtec/rtc05.pdf>.
- [10] 仮屋, 林, 金子, “無線フィードバック制御のための通信路誤りのパターンを考慮した状態推定法,” 第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会(SCI' 15), May 2015.

〈発表資料〉

| 題 名 | 掲載誌・学会名等 | 発表年月 |
|--|--|-------------------|
| 通信路誤りのパターンを考慮した状態予測法に基づくネットワーク化制御 | 電子情報通信学会技術研究報告 RCC2015-15 | 2015 年 5 月 |
| Digital Cancellation of Self-Interference for Single-Frequency Full-Duplex Relay Stations via Sampled-Data Control | SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration | 2015 年 9 月 |
| A Study on Adaptive Modulation for CSMA/CA Based MIMO Communication-Based Train Control Systems | 電子情報通信学会総合大会 A-17-8 | 2016 年 3 月 |
| An Adaptive Modulation and Coding Scheme for Communication-Based Train Control Systems with CSMA/CA | 第60回システム制御情報学会研究発表講演会(SCI' 16) | 2016 年 5 月 |
| A New Adaptive Modulation and Coding Method for Communication-Based Train Control Systems using WLAN | 6th IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems | 2016 年 9 月(採録決定済) |