

研究速報

無線制御システムに通信品質が与える影響に関する一検討

打田 良介^{†a)} (学生員) 岡田 啓^{††} (正員)
 山里 敬也^{†††} (正員) 片山 正昭^{†††} (正員)

Influence of Characteristics of Wireless Channels on Quality of Wireless Control Systems

Ryosuke UCHIDA^{†a)}, Student Member, Hiraku OKADA^{††},
 Takaya YAMAZATO^{†††},
 and Masaaki KATAYAMA^{†††}, Members

[†] 名古屋大学大学院工学研究科電子情報システム専攻, 名古屋市
 Department of Electrical Engineering and Computer Science,
 Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-
 cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

^{††} 新潟大学超域研究機構, 新潟市
 Center for Transdisciplinary Research, Niigata University,
 8050 Ikarashi 2-no-cho, Niigata-shi, 950-2181 Japan

^{†††} 名古屋大学エコトピア科学研究所, 名古屋市
 Eco Topia Science Institute, Nagoya University, Furo-cho,
 Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

a) E-mail: uchida@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp

あらまし 工場の産業機器などの無線制御において、伝送誤りや伝送速度などの通信品質が制御品質に対して与える影響を検討する。制御信号の伝送とセンサ出力のフィードバックの両方に無線通信を用いる場合と、フィードバック信号の伝送を行わず、送信端からは制御信号のみを伝送する場合とを考える。そして、伝送誤り率の低下と同様に、伝送レートの向上もまた、制御品質の改善につながることを示す。また、制御品質を改善する上で無線通信システムで考慮すべき点についても明らかにする。

キーワード 無線制御, テレコントロール, テレメトリ, ダイバーシチ

1. まえがき

工場内における産業機器の制御においては、古くから複数のセンサの協調動作により複雑な工程を制御することが行われてきた [1]。こうしたシステムを更に高度化する上で、センサネットワークはかぎとなる技術である。

多数のセンサや制御対象間で信号を伝送するようなシステムでは、有線通信路の設置が難しく、信号の無線伝送が不可欠である。これにより、頻りにラインの組換えを生じる状況において、配線の手間を削減するなどの効果も期待できる。

無線制御システムでは、制御系に入力する信号を、無線伝送し、また制御系出力をセンサによって観測した値を無線回線でフィードバックする。このような制

御システムは従来、テレコントロール/テレメトリ [2] として知られている。しかし、現実の工場内産業機器の制御では、信頼性に不安のある無線制御は避けられる傾向にある。無線による産業機器制御は、文献 [3]~ [5] などにわずかに検討例があるのみである。

工場内等において産業機器の制御に無線を応用する場合、金属製の機器による強い反射波の存在のために、送受信機間が見通し内であってもフェージングにより受信信号電力が大きく変動する。これは無線制御の信頼性の主要な低下要因である [6]。

このような環境で制御品質を改善するための一つの方策は、ダイバーシチなどの無線通信システムの誤り率の改善手法を用いることである [7]。これに対して本論文では、無線通信システムの誤り率だけでなく伝送レートにも着目し、これらが制御品質に対して与える影響を検討する。

2. システムモデル

2.1 制御システム

本論文においては、一次フィードバック制御系を考える。入力信号 $x(t)$ に対する応答 $y(t)$ の関係は、

$$x(t) = \frac{dy(t)}{dt} + Ky(t) \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 K は定数である。この制御系の閉ループ伝達関数は次式で与えられる。

$$H(s) = \frac{1}{s + K} \quad (2)$$

すなわちこの制御系は、信号処理の観点では、遮断周波数が $f_c = K/2\pi$ [Hz] の低域通過フィルタと考えることができる。

このフィードバック制御系をもとに、まず、図 1 のようなモデルを考える (これを Type I とする)。この場合は、制御局からは入力信号 $x(t)$ が送信される。無線通信部の受信機側においては、この信号は伝送誤りを含む $\hat{x}(t)$ となる。これが制御系のローカルなフィードバックループに入力され、信号 $y_1(t)$ が出力される。

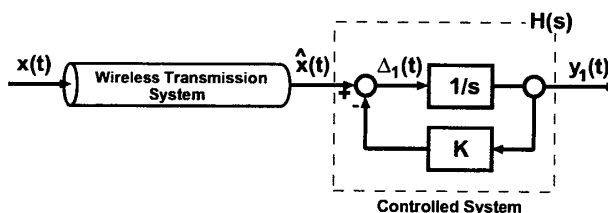


図 1 無線制御システム (Type I)

Fig. 1 Wireless feed-back control system (Type I).

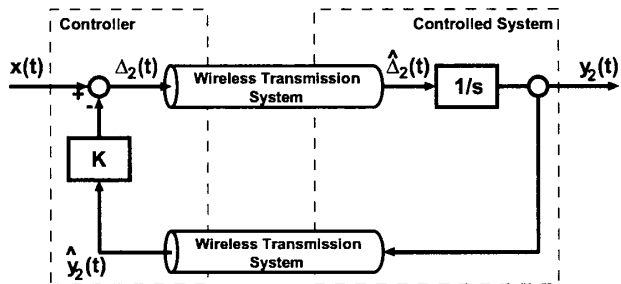


図 2 無線制御システム (Type II)

Fig. 2 Wireless feed-back control system (Type II).

更に、図 2 に示すフィードバックループの中に無線通信部が含まれるモデルも考える (これを Type II とする)。このモデルは、センサ出力信号 $y_2(t)$ を無線通信によって制御局にフィードバックし、制御局で生成された制御信号 $\Delta_2(t)$ を無線で制御対象に伝送するという状況を考慮したモデルである。

2.2 無線通信部

制御信号の伝送に用いる無線通信部の構成を図 3 に示す。ここでは図 1 における制御信号 $x(t)$ の伝送に着目した場合の無線通信部の構成を示しているが、図 2 における $\Delta_2(t)$ や $y_2(t)$ などの他の制御信号を伝送する場合も同様の構成をとる。

送信機ではまず、信号 $x(t)$ を離散化し、離散サンプル値 $x[l] = x(lT_s)$ を得る。ここで、 T_s [s] はサンプリング間隔で、 $T_s \ll 1/2f_c$ とする。各離散サンプル値は、十分に大きなダイナミックレンジをもち、かつ量子化誤差が無視できる程度に小さくなるよう、適切な方法によってビット列で表現される。送信機では、各サンプル時刻ごとに、その時刻のサンプル値を表すビット列を一つの無線パケットによって送信する。このとき無線パケット内には、誤り検出符号化情報、通信制御情報なども含まれる。本論文では、それらの情報も含めた一つの無線パケットの大きさを、 L ビットとする。

受信機はまず、受信信号を復調、検波し、送信機から送信されたサンプル値 $x[l]$ の推定値 $\hat{x}[l]$ を得る。通信路復号時に伝送誤りが検出された場合は、誤った値で制御を行うことを避けるために、 $\hat{x}[l]$ として前の値 $\hat{x}[l-1]$ をそのまま保持するものとする。このとき、 l 番目のサンプル値の伝送に誤りが発生する確率、すなわち $\hat{x}[l] = \hat{x}[l-1]$ となる確率を $p[l]$ で表す。フェージング環境では、信号強度の変動に伴いこの誤り率 $p[l]$ は確率過程となる。また、フェージング速度がサンプリング速度よりも遅い場合、一般に、異なるサン

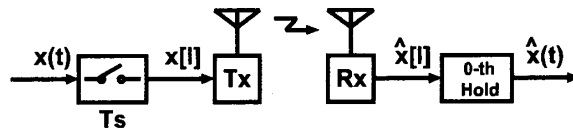


図 3 無線通信部

Fig. 3 Wireless transmission system.

プル時刻の $p[l]$ は、独立ではない。最後に受信機は、得られた推定値 $\hat{x}[l]$ をもとに、0 次ホールドによって連続時間信号 $\hat{x}(t)$ を再生し、制御対象に入力する。

3. 通信品質と制御品質の関係

制御信号 $x(t)$ として、次式で与える正弦波を考える。

$$x(t) = \begin{cases} \sin(2\pi f_m t + \phi) & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $f_m = f_c/2$ とする。また、制御システムのパラメータは、 $K = \pi$ とする。Type I のシステムの送信機は信号 $x(t)$ を、また Type II では $\Delta_2(t)$ 、 $y_2(t)$ をサンプリングし、PCM 符号化を行い BPSK 変調して送信する。ここで、 $L = 64$ とする。無線通信路は、工場内の伝搬測定例 [6] を参考に、ドップラー周波数が $f_d = 5f_c$ または $f_c/2$ の時変フラットレイリーフェージングチャネルとする。また各々の受信機における受信信号のビットエネルギーと雑音電力密度比の平均値を $\overline{E_b/N_0}$ とする。Type II においては二つの無線回線は同じ $\overline{E_b/N_0}$ をもち、互いに独立なフェージングを受けるものと仮定する。

まず、Type I の場合の制御系出力 $y_1(t)$ と理想出力 $y(t)$ との二乗誤差を時間平均し、 $y(t)$ の電力で正規化したもの (MSE) を図 4 に示す。この図では伝送レート ($1/T_s$) と $\overline{E_b/N_0}$ の関数として MSE を示している。ここで示す MSE には、伝送誤りの影響のほかに、離散サンプル値を 0 次ホールドによって再生した影響が含まれる。しかし、量子化誤差は十分に小さいと仮定しているため、量子化誤差の影響は含まれない。この図から分かるとおり、伝送レート $1/T_s$ や $\overline{E_b/N_0}$ の増加とともに MSE は小さくなる。また、 $\overline{E_b/N_0}$ が一定の場合においても伝送レート $1/T_s$ を高くすることで MSE が改善すること、逆に伝送レートが一定の場合でも、 $\overline{E_b/N_0}$ を増加、すなわち伝送誤り率を低減することで MSE が改善することが分かる。更に、 $\overline{E_b/N_0}$ の劣化を伝送レートの向上によって補うことが可能な場合が存在することも分かる。例えば、 $\overline{E_b/N_0}$ が 30 [dB] を超える場合、伝送レートが 2.5 [sample/s] 程度で $\text{MSE} = 10^{-1}$ となる一方で、 $\overline{E_b/N_0}$ が 5 [dB] 程

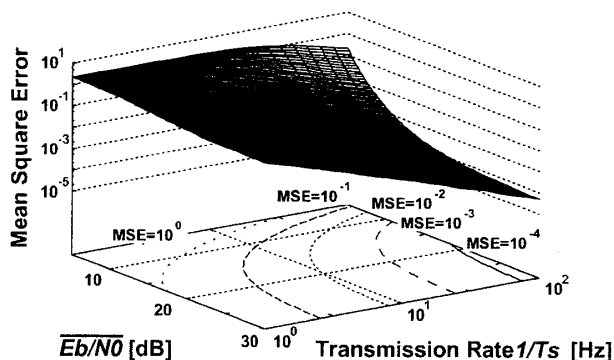


図 4 Type I の場合の出力の MSE ($f_d = 5f_c$)

Fig. 4 Time-averaged mean-square error at the output of Type I system when $f_d = 5f_c$.

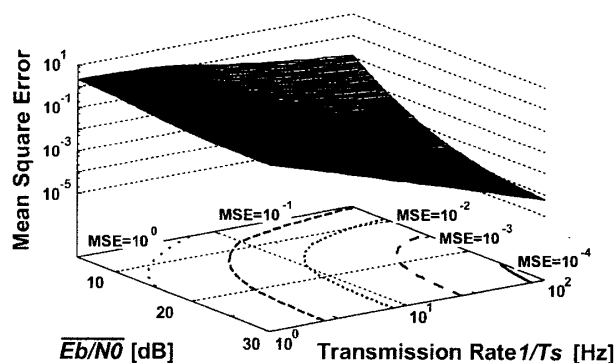


図 6 Type I の場合の出力の MSE ($f_d = f_c/2$)

Fig. 6 Time-averaged mean-square error at the output of Type I system when $f_d = f_c/2$.

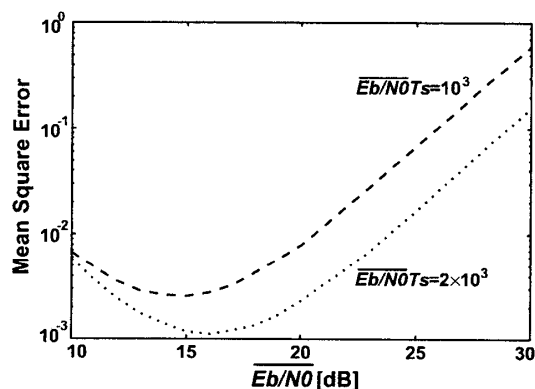


図 5 Type I で平均電力を一定とした場合の出力の MSE

Fig. 5 Time-averaged mean-square error at the output of Type I system in the condition under constant transmission power.

度まで劣化した場合でも伝送レートを 100 [sample/s] まで向上すれば、同じ MSE を達成している。しかし、どちらか一方の改善のみでは、一定以上の品質の改善が難しいことも分かる。つまり、制御品質を更に向上するためには $\overline{E_b/N_0}$ と $1/T_s$ の両方を改善する必要がある。

伝送レート $1/T_s$ と $\overline{E_b/N_0}$ の増加は、単位時間当りの平均電力を増加することにつながる。そこで次に、この積を一定とした場合の MSE を図 5 に示す。この図から、与えられた雑音電力密度のもとで平均送信電力を一定とした条件下では、1 ビット当りの送信エネルギーを適切に選ぶことで、MSE を最小にできることが分かる。このとき、それに対応して伝送レートにも最適値が存在する。このことから、制御品質の向上のために伝送路誤り率と伝送レートを改善するとき、より少ない平均送信電力でより高い制御品質を得るためには、伝送誤り率の改善と伝送レートの向上に対して適切にエネルギーを分配する必要があることが分かる。

次にフェージング変動がより遅い場合 ($f_d = f_c/2$) を考える。このとき、MSE は図 6 のようになる。図 4 と図 6 とを比較すると、フェージング変動の遅い (ドップラー周波数の小さい) 図 6 の場合の方が、伝送レートが大きい範囲 (10^2 付近) において、より小さい MSE を実現するために必要な $\overline{E_b/N_0}$ が大きくなることが分かる。これは、次のように考えることができる。受信機で誤りが検出されたとき、サンプル値を 0 次ホールドすることで生じる実際の信号との誤差は、サンプル時刻からの時間の経過とともに大きくなる。このとき、伝送レートが十分に高く、フェージング変動が高速ならば、連続してサンプル値の伝送を誤る確率が小さくなり、誤差が拡大する前に次のサンプル値が受信される確率が高くなる。よってフェージング変動が速い方が、伝送誤りがもたらす誤差を小さくできると考えられる。

最後に、Type II の場合の制御系出力 $y_2(t)$ と理想出力 $y(t)$ との MSE を図 7 に示す。この図と図 4 とを比較すると、Type II も Type I と同様に、伝送レート $1/T_s$ や $\overline{E_b/N_0}$ の増加とともに MSE は小さくなることが分かる。また、誤り率が一定の場合においても伝送レート $1/T_s$ を高くすることで MSE が改善すること、逆に伝送レートが一定の場合でも、誤り率を低減することで MSE が改善することや、どちらか一方の改善のみでは、一定以上の品質の改善が難しいことも Type I と同様である。

以上の議論は、簡単な一次フィードバック制御系を用いて行われているが、制御系が線形近似できる範囲においては、より高次のフィードバック系に対しても、同様の議論が可能であると考えられる。これは、線形系では、受信制御信号に含まれる伝送誤差の大きさに

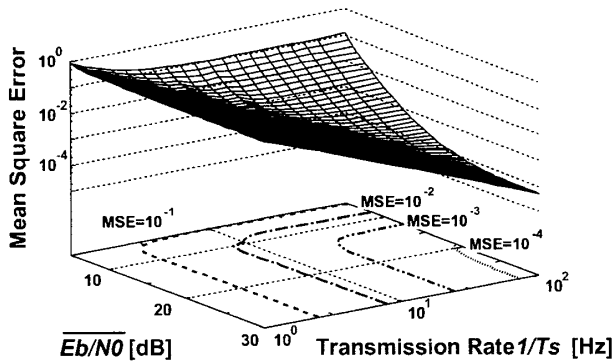


図 7 Type II の場合の出力の MSE ($f_d = 5f_c$)

Fig. 7 Time-averaged mean-square error at the output of Type II system when $f_d = 5f_c$.

比例して、出力の MSE が決まるからである。つまり、 E_b/N_0 と $1/T_s$ に対する伝送誤差の振舞いが同じであれば、どのような線形制御系においても同様の議論が成り立つことが予想される。

4. む す び

本論文では、制御信号を無線伝送する場合に、伝送レートと伝送誤りが制御品質に与える影響を調べた。制御系としてフィードバック制御系を考え、無線通信システムがフィードバック系の外にある場合と内にある場合とについて制御品質を調べた結果、伝送誤りだけでなく、伝送レートの向上によっても制御品質を改善することが可能であることが分かった。また、一定の送信電力が与えられた場合、伝送誤り率の低減と伝送レートの向上のそれぞれに対するエネルギー配分に、

最適値があることも分かった。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省 21 世紀 COE プログラム「先端プラズマ科学が拓くナノ情報デバイス」の助成を受けて行われたものである。記して謝意を表する。

文 献

- [1] 安藤 繁, 田村陽介, 戸辺義人, 南 正輝 (編), センサネットワーク技術, 東京電機大学出版局, 2005.
- [2] F. Carden, R. Jedlicka, and R. Henry, Telemetry Systems Engineering, Artech House, 2002.
- [3] A. Willig, K. Matheus, and A. Wolisz, "Wireless technology in industrial networks," Proc. IEEE, vol.93, no.6, pp.1130-1151, June 2005.
- [4] F.L. Lian, J. Moyne, and D. Tilbury, "Network design consideration for distributed control systems," IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol.10, no.2, pp.297-307, March 2002.
- [5] N.J. Ploplys, P.A. Kawka, and A.G. Alleyne, "Closed-loop control over wireless networks," IEEE Control Syst. Mag., vol.24, no.3, pp.58-71, June 2004.
- [6] T.S. Rappaport, "Indoor radio communications for factories of the future," IEEE Commun. Mag., vol.27, no.5, pp.15-24, May 1989.
- [7] R. Uchida, H. Okada, T. Yamazato, and M. Katayama, "A mimo system with relay terminals for reliable wireless control," Proc. 16th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication, G04-04, Sept. 2005.

(平成 18 年 3 月 24 日受付, 6 月 5 日再受付,
8 月 17 日最終原稿受付)