AMD の可動限界を考慮した可変フィードバックゲイン制御による制震

VARIABLE GAIN-BASED STRUCTURAL CONTROL ACCOUNTING FOR THE LIMIT OF AMD MOVEMENT

西谷 章*, 仁田佳宏**

Akira NISHITANI and Yoshihiro NITTA

Active structural-control is a new technology of earthquake resistance strategy for civil structures. This technology, however, is currently under way of development, having some issues to be solved. One of the most significant issues is how to control buildings regardless of earthquake severeness. This paper presents variable gain-based structural control accounting for AMD stroke limitation. The control algorithm is based on the philosophy of Maximal admissible set of initial state, which was originally proposed for a system with no input excitation. Simulated and experimental results demonstrates how effectively and satisfactorily the presented methodology works.

Keywords : *Variable feedback gain, AMD stroke, LQG theory, Maximal admissible set of initial state, External excitation*
可変フィードバックゲイン, AMD ストローク, LQG 理論,
最大許容初期状態集合, 外乱

1 はじめに

近年の急速な科学技術の発展は、多くの工学分野において、従来のあり方を超えた発想を現実のものとし始めている。建築分野におけるアクティブ制震はこの代表例のひとつであり、次世代の耐震構造としての期待も大きく、これまでにアクティブ制震を中心とした国際的な共同活動も展開されている²⁾。現在のアクティブ制震構造は、AMD や HMD のような付加的な質量を駆動させることにより発生する慣性力を制御力として利用する方式を基本としているものが多い³⁾。一般に、あらゆる制御装置はそれぞれ性能限界をもつが、この AMD あるいは HMD 方式においては、可動限界やこの付加的な質量を駆動させるために加える力などに対して限界があり、残念ながら現在のところ、あらゆる地震動に対応可能なものとはなっていない。本論文は、AMD にかかわる性能限界を考慮したフィードバックゲイン制御の開発を目的に、地震動の大きさによらず適用可能な制御システムとして、AMD のストローク限界 (AMD や HMD の動き (変位) を「ストローク」と呼ぶ) を考慮した可変フィードバックゲイン制御システムの設計法を示し、その有効性を示す。

AMD 方式における制御装置の性能制約としては、AMD に加える力とストロークがある。AMD に加える力にかかわる制約を

考慮する場合には、Bang-Bang 制御に代表される飽和制御により、大地震時までの効果的な制御が可能となる^{4,5)}。しかし、飽和制御は、制御力の拘束への対処を目的としており、AMD のストローク限界を対処するには不向きである。

このストローク限界を考慮するために、AMD の状態によりゲインを切り替える可変フィードバックゲイン制御が提案され^{6~9)}、実構造物への適用を通してその効果が実証されているものもある^{8,9)}。しかしながら、これらの可変フィードバックゲイン制御の多くは、ゲイン切り替えの判断基準となる、AMD の状態 (ストロークと速度) に関する閾値レベルの設定が試行錯誤的であり、合理的な設定となっている保証はない。また、複数のゲインを 1 変数の連続関数に近似し、合理的にゲイン切り替えを行う制御¹⁰⁾も提案されているが、この場合には、AMD のストロークを予測しなければならない。さらに、既存の手法の多くは、AMD の速度とストロークのみをゲイン切り替えの判断基準に用いており、建築構造物の状態を加味してゲインを切り替えている可変フィードバックゲイン制御はほとんど見られない。本論文では、AMD と建築物の状態を考慮した可変フィードバックゲイン制御を目的として、最大許容初期状態集合¹¹⁾を用いて、合理的なゲインの切り替えを提案する。この最大許容初期状態集合を用いた制御アルゴリズムは、もともと外乱のない

本論文は、35th IEEE Conference on Decision and Control で発表した内容 (文献1) をもとに、あらたな計算、あらたな実験により大幅な修正を加えたものである。

* 早稲田大学理工学部建築学科 教授・Ph. D.・工博

** 早稲田大学大学院 大学院生・修士 (工学)

Prof., Dept. of Architecture, Waseda Univ., Ph. D., Dr. Eng.

Graduate Student, Dept. of Architecture, Waseda Univ., M. Eng.

Figure 1 Building Model with AMD

システム用に開発されたものであるが、外乱を受ける構造物に応用する。

2 可変フィードバックゲイン制御

2.1 状態フィードバックゲインの設計

AMD 方式の制震構造においては、制御コンピュータからの出力である制御信号にしたがって、アクチュエータが AMD に力を加え、AMD を駆動する。制御工学的には、AMD の動きによって生ずる慣性力を「制御入力」とする定式化も可能であるが、以下の定式化にあたっては、制御コンピュータがアクチュエータを介して AMD に加える力を「制御入力」としてスカラー量 u で表し、以下「制御力」と呼ぶことにする。

Fig.1 に示すような AMD による n 層構造物の振動制御を考える。図に示す座標系を用いて、AMD の動きを含む構造物全体の状態 X を以下のように表す：

$$X(k) = [\dot{x}_1(k) \cdots \dot{x}_n(k) \dot{x}_a(k) x_1(k) \cdots x_n(k) x_a(k)]^T \quad (1)$$

ただし、 $x_i(k)$ は、 Δt を離散時間幅として、時刻 $k\Delta t$ における x_i の値を意味する。また右肩の上添字 T は転置を表している。

この制震建物の離散時間状態方程式を以下のように表す。

$$X(k+1) = AX(k) + Bu(k) + Ef(k) \quad (2)$$

ただし、 $u(k)$ ：時刻 $k\Delta t$ における制御力（スカラー）； $f(k)$ ：時刻 $k\Delta t$ における外乱（スカラー）； A ：AMD と n 層構造物の特性を表す $2(n+1)$ 行 $\times$ $2(n+1)$ 列の離散時間システム行列； B ：制御力の作用位置を示す $2(n+1)$ 行のベクトル； E ：外乱の作用位置を示す $2(n+1)$ 行のベクトル、となる。

制御力 $u(k)$ 決定のためのフィードバックゲイン（以降、表記を簡略化するため、FB ゲイン、と表すことにする）は、 M 個の FB ゲイン G_m ($m = 1 \sim M$) の中から各時刻ごとに 1 つ選ばれるものとする。制御力 $u(k)$ は次のように決定される。

$$u(k) = G_m X(k) \quad (3)$$

G_m は、LQG 理論を用いて以下の評価関数、 J 、を最小にするように決めるものとする。

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} [X^T(k) Q_m X(k) + r u(k)^2] \quad (4)$$

上式中のスカラー r および行列 Q_m は重み係数である。異なる M 個の Q_m を用いて、次の離散リカッチ方程式：

$$P_m = Q_m + A^T P_m A - A^T P_m B [r + B^T P_m B]^{-1} B^T P_m A \quad (5)$$

を P_m について解き、 P_m から G_m を以下のように求める。

$$G_m = -[r + B^T P_m B]^{-1} B^T P_m A \quad (6)$$

本論文では、 Q_m を以下のように設定する。

$$Q_m = \text{diag} [q_1', \cdots, q_n', q_a', q_1, \cdots, q_n, q_a] \quad (7)$$

ただし、 $\text{diag}[\] : [\]$ の要素を対角要素とする対角行列

q_a' ：AMD の速度にかかる重み

q_a ：AMD のストロークにかかる重み

q_i' ：構造物の i 層の速度にかかる重み

q_i ：構造物の i 層の変位にかかる重み。

このとき、

$$q_1' : q_2' : \cdots : q_n' : q_a' : q_1 : q_2 : \cdots : q_n$$

の比を常に一定とすれば、 q_a/q_n' が大きくなるように設定するにしたがって、制御の主目的が構造物の応答低減から AMD のストロークの低減へと移る。すなわち、 q_a/q_n' が小さいほど、制御効果が高く、AMD のストロークを積極的に使う FB ゲインとなり、 q_a/q_n' が大きいほど、AMD のストロークは小さいが、制御効果は低い FB ゲインとなる。本論文では、AMD のストロークにかかる重み q_a を変化させることで、構造物の応答低減に重きをおく FB ゲインと、AMD のストロークの低減に重きをおく FB ゲインを複数設定する。より具体的な設定については、3.2 節で述べる。

2.2 最大許容初期状態集合

外乱 $f = 0$ を前提とすれば、ある特定の FB ゲイン G_m を常に用いるときの離散時間システム方程式は、

$$X(k+1) = (A + BG_m)X(k) \quad (8)$$

となる。このとき離散時間システム方程式 (8) は、初期値 $X(0)$ を用いて、

$$\begin{aligned} X(k+1) &= (A + BG_m)X(k) \\ &= (A + BG_m)^2 X(k-1) \\ &\vdots \\ &= (A + BG_m)^k X(1) \\ &= (A + BG_m)^{k+1} X(0) \end{aligned} \quad (9)$$

のように書き換えることができる。つまり、外乱入力のない構造物であれば、初期値 $X(0)$ からその後の応答を予測できる。

AMD のストローク x_a を、

$$C = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1]$$

として、

$$x_a(k) = CX(k) \quad (10)$$

のように表せば、AMD のストローク x_a は、

$$x_a(k) = C(A + BG_m)^k X(0) \quad (11)$$

AMD のストロークには限界があるので、ここで次のような拘束条件を課す：

$$|x_a(k)| \leq \rho \quad (12)$$

この拘束条件は、式 (11) により $X(0)$ に関する以下の拘束条件に置き換えることができる。

$$|\frac{1}{\rho} x_a(k)| = |\frac{1}{\rho} C(A + BG_m)^k X(0)| \leq 1 \quad (13)$$

ここで、

$$z(k)^T = \frac{1}{\rho} C(A + BG_m)^k \quad (14)$$

と表すことにすれば、拘束条件は

$$|z(k)^T X(0)| \leq 1 \quad (15)$$

となる。

時刻 N の時点まで拘束条件 (15) を満たす $X(0)$ の集合を $S(N)$ と表し、許容初期状態集合 (Admissible set of initial state) と呼ぶ。 $S(N)$ は以下のように定義される：

$$S(N) = \bigcap_{k=0}^N \{X(0) \mid |z(k)^T X(0)| \leq 1\} \quad (16)$$

式 (16) を模式的に示せば、Fig.2 のようになる。

式 (8) の離散時間システム方程式が安定であれば、許容初期状態集合 $S(N)$ は単調非増加で、原点対象な凸多面体となることが知られている¹¹⁾。 $N \rightarrow \infty$ とすると、許容初期状態集合 $S(N)$ は、下限 S に収束する。この下限 S が最大許容初期状態集合と呼ばれる¹¹⁾。最大許容初期状態集合 S は、外乱のない場合の、FB ゲイン制御にかかわる拘束条件を満たす初期値の最大集合を意味する。

ここで、許容初期状態集合 $S(N)$ と次のような関係にある集合 $\tilde{S}(N)$ を $S(N)$ の双対集合として定義する。

$$\tilde{S}(N) = \{z(k) \mid |X(0)^T z(k)| \leq 1, X(0) \in S(N)\} \quad (17)$$

この双対集合 $\tilde{S}(N)$ は、 $\pm z(k)$ ($k = 0 \sim N$) を用いて、次のように表すことができる¹¹⁾。

$$\tilde{S}(N) = \{z : z = \sum_{k=0}^N (\alpha_k - \beta_k) z(k), \alpha_k, \beta_k \geq 0, \sum_{k=0}^N (\alpha_k + \beta_k) = 1\} \quad (18)$$

Figure 2 Admissible Set

式 (18) のように、非負で総和が 1 となる係数をもつベクトルの 1 次結合を凸結合といい、以下のように表す¹²⁾：

$$\tilde{S}(N) = K\{z(0), \dots, z(N), -z(0), \dots, -z(N)\} \quad (19)$$

ここで、 $K\{\cdot\}$ はベクトル集合 $\{\cdot\}$ の凸結合を表す。

$S(N)$ と $\tilde{S}(N)$ は互いに双対集合の関係であるので、 $S(N)$ が単調非増加であれば、その双対集合 $\tilde{S}(N)$ は単調非減少となり、その上限 $\tilde{S}$ の双対集合が最大許容初期状態集合 S となる。

FB ゲインの切り替えは、 $S \in X(k)$ の判定を用いる。

$\tilde{S}$ の端点を $e_1, e_2, \dots, e_p$ (すべて $2(n+1)$ 行のベクトル) とすると、

$$\tilde{S} = K\{e_1, e_2, \dots, e_p\} \quad (20)$$

および

$$S = \{X(0) : (e_i)^T X(0) \leq 1, i = 1 \sim p\} \quad (21)$$

が成り立つことが知られている¹¹⁾。このように、 $\tilde{S}$ の端点により最大許容初期状態集合 S を表すことができるので、 $S \in X(k)$ の判定を、 $\tilde{S}$ の端点 e_i を用いて、 $(e_i)^T X(k) \leq 1$ によって行う。本論文では、 $\tilde{S}$ の端点は吉田らの提案する方法¹¹⁾により求める。

2.3 制御アルゴリズム

外乱入力のないシステムでは、状態 X が一度最大許容初期状態集合に含まれれば、その後の状態 X は必ず最大許容初期状態集合に含まれる。つまり、最大許容初期状態集合内に初期値が含まれるような FB ゲインを用いれば、必ず拘束条件を満たす制御となる。しかし、建築・土木分野の制震では、地震、風などによる外乱入力が存在するため、ある時刻で状態 X が最大許容初期状態集合に含まれていたとしても、その後の保証とはならない。しかも、地震や風などの外乱は、時刻歴及び継続時間をあらかじめ予測することはできない。

そこで、毎時刻の状態を初期値とみなし、毎時刻ごとに、状態を最大許容初期状態集合を含む FB ゲインを全て選び出す。選び出された複数の FB ゲインのうち、AMD のストロークに対する重み

Figure 3 Control Algorithm

が小さいものほど、AMD のストロークを大きく使うことになり、高い制御効果につながる。したがって、高い制御効果を得るために、AMD のストロークに対する重みが最も小さい FB ゲインを用いて、制御力 u を決定すればよい。

上記の制御アルゴリズムのフローチャートを Fig.3 に示す。ただし、 M 個のゲインのうち、AMD のストロークの重みが最も大きい（つまり最も制御効果の低い）ゲインを G_1 、最も小さい（つまり最も制御効果の高い）ゲインを G_M とし、各ゲイン G_m についての最大許容初期状態集合を S_m とする。

3 制震効果の確認シミュレーション

3.1 制御対象モデル

構造物モデルは、最上階に AMD を備える 4 層建築構造物とする。後に示す実験に用いる試験体のモデルに合わせて、AMD の質量を 0.77 kg、建築構造物の各層の質量を、4 層：2.55 kg、3 層：1.62 kg、2 層：1.47 kg、1 層：1.47 kg とする。AMD のストローク限界は 1.2 cm である。また、各次の固有振動数と減衰定数を Table 1 に、最上層の絶対加速度の周波数応答の絶対値を Fig.4 にそれぞれ示す。

制震効果の確認にあたっては、構造物モデルの 1 次固有振動数近傍に卓越振動数を持つ Taft 1952 NS を地震波として用いた。

3.2 シミュレーション結果

$M = 3$ として、LQG 理論にもとづいて、 G_1 、 G_2 、 G_3 の 3 つのゲインを以下のように設定する。

Table 1 Natural Frequencies and Damping Ratios

mode	natural frequency	damping ratio
1	2.8[Hz]	0.019
2	8.9[Hz]	0.088
3	14.8[Hz]	0.0098
4	19.6[Hz]	0.0014

Figure 4 Absolute Value of Frequency Response of Top-floor Absolute Acceleration

式 (4) の評価関数 J は、状態を評価する $X^T Q_m X$ と制御力を評価する ru^2 の項から成っている。

まず、 $X^T Q_m X$ の項に注目すると、

$$X^T Q_m X = \dot{x}_1^2 q_1' + \cdots + \dot{x}_4^2 q_4' + \dot{x}_a^2 q_a' + x_1^2 q_1 + \cdots + x_4^2 q_4 + x_a^2 q_a$$

となる。一般的に $\dot{x}_i > x_i$ となるため、各層の速度、変位の様な低減を制御目標とするのであれば、評価関数中において、各層の速度、変位を同じレベルで考慮できるように Q_m を設定する必要がある¹³⁾。具体的には、非制御時において

$$\dot{x}_1^2 q_1' = \cdots = \dot{x}_4^2 q_4' = x_1^2 q_1 = \cdots = x_4^2 q_4$$

が成り立つように、 q_a 以外の重みの比を以下のように設定する。

$$q_1' : q_2' : q_3' : q_4' : q_a' : q_1 : q_2 : q_3 : q_4 = 7.17 : 2.38 : 1.40 : 1 : 0.001 : 3000 : 840 : 440 : 320$$

ただし、本論文では、AMD の速度低減は考慮していないため、 q_a' については極端に小さな数値を設定している。

つぎに、 $X^T Q_m X$ と ru^2 の項の係数に注目する。LQG 理論では、評価関数を最小にするように FB ゲインを決定するため、FB ゲインの大きさは Q_m の各要素と r の相対的な大きさの係数に依存する。 Q_m の各要素が相対的に小さいと、制御効果よりも制御力の節約に重きをおく FB ゲインとなり、 Q_m の各要素が相対的に大きいと制御効果に重きをおく FB ゲインとなる。

そこで、FB ゲインの主目的が制御力の節約から制御効果へと変化する様子を定量的に把握する意味で、 $r = 1$ と固定し、 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 の各要素の比は一定としたまま、各要素の値を連続的にスカラー倍して変化させ、制御力 u の RMS 値に対する最上層の応答変位および AMD のストロークの RMS 値の関係を調べる。

Figure 5 Relationship between Control Force and Top-floor Displacement

Figure 6 Relationship between Control Force and AMD Stroke

ここで q_a/q_4' の比として

$$Q_1 : 5.0 \times 10^7$$

$$Q_2 : 1.0 \times 10^3$$

$$Q_3 : 1.0 \times 10^2$$

の3つのケースを想定している。

制御力 u の RMS 値を横軸にとり、Fig.5 の縦軸に最上層の変位 x_4 の RMS 値を、Fig.6 の縦軸に AMD のストローク x_a の RMS 値を示す。Figs.5, 6 から、 Q_1 は Q_2 に比べて制御効果よりも AMD のストロークの低減に重きを置いた重み行列であり、 Q_3 は Q_2 に比べて AMD のストロークの低減よりも制御効果に重きを置いた重み行列であることが確認できる。

本論文では、必要となる制御力 u が、FB ゲインによらず一定となるように、また AMD ストロークの RMS 値については G_1 が G_2 の約半分となるように、FB ゲインを選んだ。各 G_m について、Figs.5, 6 に G_1 , G_2 , G_3 の3つのゲインを決定した点を ● で表している。 G_1 , G_2 , G_3 それぞれに対しての q_4' の値は

$$G_1 : q_4' = 4.6 \times 10^{-3}$$

$$G_2 : q_4' = 2.1 \times 10^2$$

$$G_3 : q_4' = 1.4 \times 10^2$$

である。

以上のようにして、 G_1 , G_2 , G_3 が決定されたので、最大加速度の変化に対する可変 FB ゲイン制御の効果を考察する目的で、最上層の変位の RMS 値と最大値、AMD のストロークの最大値をそれぞれ Figs.7 ~ 9 に示す。

Figure 7 RMS of Top-floor Displacement

Figure 8 Maximum Value of Top-floor Displacement

Figure 9 Maximum Value of AMD Stroke

これらの図より、非制御時と比較して、可変 FB ゲイン制御が最大加速度の大きさによらず、AMD のストロークの限界内で、最上層の変位の RMS 値、最大値をともに低減させていることが確認できる。

G_1 のみの制御と比較すると、次のことがわかる： i) 最大加速度の大きさによらず最上層変位の RMS 値が小さな値となり、特に最大加速度が小さい間は、 G_1 のみの制御の半分ほどに低減される； ii) 最上層変位の最大値は、RMS 値と同様小さい値を示すが、最大加速度が大きくなるとほぼ同じ値となる； iii) 小地震のうちから AMD のストロークを限界まで使用し、AMD の性能を活用した効果的な振動制御が行える； iv) 制御が適用できる地震の範囲がわずかではあるが広がる。

最大加速度を 300 cm/s^2 とした場合の最上層の変位、AMD のストロークの時刻歴応答とゲイン切り替えの様子を Fig.10 (a) ~ (c) に示す。ただし、Fig.10 (b) 中の点線は AMD ストロークの限界値を表す。これらの図からも、AMD のストロークの限界内で FB ゲインを効率良く切り替えて、効果的な制御を行っていることが確認できる。

(a) Top floor displacement

(b) AMD stroke

(c) Feedback gain

Figure 10 Responses for Taft 1952 NS with Peak Acceleration = 300 cm/s^2

以上により、本論文の可変フィードバックゲイン制御の有効性をシミュレーションにより示した。

実験による効果の確認に移る前に、ここで、制御の非線形性を確認する意味で、制御対象モデルの1次固有振動数 2.8 Hz の $\sin$ 波を入力地震動とした場合の最大加速度の違いによる制御力 (AMD に加える力 u) と最上層変位との関係をプロットしてみる。予備的な検討を通して、この $\sin$ 波に対しては最大加速度がほぼ 70 cm/s^2 を超えるとゲイン G_1 のみが適用され、ほぼ 45 cm/s^2 以下となると常時ゲイン G_3 が適用可能となることから、最大加速度として $45, 55, 70 \text{ cm/s}^2$ を設定している。Fig.11 (a) は、ゲイン G_1 を用いたときの結果であり、当然であるが、両者の関係は常に相似形となっている。これに対し、可変 FB ゲイン制御では、最大加速度に応じて、AMD のストロークに余裕のあるうちは大きな制御力を使って応答低減を行っている。つまり、可変 FB ゲイン制御は、複数の FB ゲインを用いるため、外乱の大きさに合わせて最適な制御を行っている。

(a) G_1 only

(b) Variable feedback gain

Figure 11 Relationship between Control Force and Top-floor Displacement

4 制震効果の確認実験

実際の構造物の制震では、すべての状態を観測することは困難である。そこで、観測できる状態のみで制震を行うために、一般化変位と一般化速度からなる状態により表される低次元化システムを用いる。実験においては、AMD の速度、ストロークと構造物の最上層の地面との相対速度、相対変位により、モード変換を用いて、AMD と 1 次モードの一般化座標からなるシステムに低次元化する¹⁴⁾。

FB ゲインは、シミュレーション同様、LQG 理論から求めた G_1, G_2, G_3 の 3 個のゲインを用いる。 G_3, G_2, G_1 の順に、ストロークを大きく使い制御効果をあげるゲインとなっている。実験では、1 次モードに対する一般化座標および AMD の動きにより、低次元化モデルを構成する。1 次モードの一般化変位を η_1 とすると、この場合の状態 X は

$$X = [\eta_1 \quad \dot{x}_a \quad \eta_1 \quad x_a]^T$$

であり、 X に相当する重み行列は、

$$Q_m = \text{diag}[q_1', q_a', q_1, q_a]$$

となる。AMD のストロークに対する重み q_a と 1 次モードの一般化速度 $\dot{\eta}_1$ に対する重み q_1' の比をそれぞれ、

$$q_a/q_1' = 2.5 \times 10^3, 5.0 \times 10^2, 1.0 \times 10^2$$

として求めた FB ゲインを G_1, G_2, G_3 とする。白色雑音入力時の η_1 の RMS 値により G_1, G_2, G_3 による制御効果を比較すれば、

(a)Top floor acceleration

(b)Top floor displacement

(c)AMD stroke

**Figure 12 Responses for Taft 1952 NS with
Peak Acceleration = 260 cm/s²**

$$[G_2 \text{による制御}]/[G_1 \text{による制御}] = 0.79$$

$$[G_3 \text{による制御}]/[G_1 \text{による制御}] = 0.70$$

AMD ストロークの RMS 値により、同様の比較を行えば、

$$[G_2 \text{による制御}]/[G_1 \text{による制御}] = 1.6$$

$$[G_3 \text{による制御}]/[G_1 \text{による制御}] = 2.3$$

次に、最大加速度 260cm/s²と 380cm/s²の Taft 1952 NS に
より実験体を加振する。サンプリング時間 Δt は 0.005 秒とする。

それぞれの場合の最上層の絶対加速度、相対変位、AMD のスト
ロークを Figs.12, 13 に示す。これらの結果より、可変 FB ゲイ
ン制御による実験モデルの絶対加速度および相対変位の低減が入力
地震動の大きさにらず確認でき、AMD のストロークを有効に活
用していることがわかる。

Figs.14, 15 に、260cm/s²と 380cm/s²それぞれの場合のゲ
インの切り替えの様子を示す。両図より、入力地震波の大きさに合
わせてゲインを変化させた効率の良い制御を行っており、可変 FB
ゲイン制御の有効性が確認できる。

(a)Top floor acceleration

(b)Top floor displacement

(c)AMD stroke

**Figure 13 Responses for Taft 1952 NS with
Peak Acceleration = 380 cm/s²**

**Figure 14 Feedback Gain Selection
(Peak Acceleration = 260 cm/s²)**

**Figure 15 Feedback Gain Selection
(Peak Acceleration = 380 cm/s²)**

5 まとめ

以上, AMD の可動限界を考慮した可変 FB ゲイン制御の設計手法を示し, その有効性をシミュレーションと実験により示した。結論をまとめると,

1. 外乱のあるアクティブ制震においても, 最大許容初期状態集合を用いることで, AMD の可動限界を考慮した FB ゲインの切り替えが可能となる。
2. 可変 FB ゲイン制御を用いると, 複数の FB ゲインの内の 1 つのみを使う制御よりも適用できる地震の範囲が広がる。
3. 複数の FB ゲインを用いるので, 地震動の大きさにあわせて, 制御装置の可動限界の中で効率の良い制震が可能となり, AMD のストロークを有効に使い, 大地震への対応も可能となる。

今後は, AMD への制御力とストローク両方の性能限界を考慮する可変 FB ゲイン制御への拡張を行う予定である。

本研究は, 日本学術振興会 未来開拓学術研究推進事業研究プロジェクト (96R15701) および鹿島学術振興財団による援助を受けた。

参考文献

- 1) A.Nishitani,Y.Nitta,N.Yamada : Variable Gain-Based Structural Control Considering the Limit of AMD Movement,Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control,1996.12
- 2) 西谷章 : 制震構造の国際的研究, 建築技術 1997 年 5 月号別冊 制震・免震構造マルチガイド,pp.65-66,1997.5
- 3) 井上豊 : 制震・免震構造の現状と動向, 建築技術 1997 年 5 月号別冊 制震・免震構造マルチガイド,pp.10-12,1997.5
- 4) B.Indrawan,T.Kobori,M.Sakamoto,N.Koshika : Analytical Study on a New Power-Efficient Active Control Method, Second.Int.Conf.MOVIC,pp.687-692,1994.8
- 5) 野田茂 : 制御力拘束を有する非線形構造物の地震応答のアクティブコントロール, アクティブ制震シンポジウム論文集,pp.65-70,1992.3
- 6) 藤田隆史, 飯田崇義, 正木信男 : 多段積層ゴムと油圧アクチュエータを用いた高層建物制振用アクティブ・マスダンパの基礎的研究 (第 2 報, 建物・マスダンパ系実験モデルによる振動制御実験), 日本機械学会論文集 (C 編),Vol.59,No.558,pp.379-385,1993.2
- 7) 川井伸泰, 大塚将, 稲葉金正, 持丸昌巳, 栗本雅裕 : アクティブ制振システムの開発 (その 3: 可変ゲイン制御による振動台試験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.895-896,1994.9
- 8) 稲葉学, 鈴木哲夫, 影山満, 野畑有秀, 吉田治 : 中層建物のアクティブ制振システム (その 18. リバーサイド隅田・高層棟における地震応答観測), 日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.851-852,1995.8
- 9) 飯田崇義, 藤田隆史, 寺本隆幸, 北村春幸, 水津洋二, 菅野正 : 日本長期信用銀行本店ビルのアクティブ制振装置-その 4 シミュレーションによる制振性能の確認-, 日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.981-982,1994.9
- 10) 長島一郎, 西山正三, 篠崎祐三 : アクティブマスダンパーを用いた建物の振動制御 -その 2 装置能力の制約を考慮した可変ゲイン制御手法とその制御性能に関する研究-, 日本建築学会構造系論文集, No.483,pp.39-49,1996.5
- 11) 吉田和信, 西村行雄, 米澤洋 : 操作量に制限がある線形系に対する可変フィードバック制御系の設計, 計測自動制御学会論文集, Vol.21, No.7, pp.677-683,1985.7
- 12) 布川晃, 中山弘隆, 谷野哲三 : 線形代数と凸解析, コロナ社,1991
- 13) T.Kobori,N.Koshika,K.Yamada,Y.Ikeda : Seismic-Response-Controlled Structure with Active Mass Driver System(Part1)Design,Earthquake Engineering and Structural Dynamics,Vol.20,No.2,pp133-149,1991.2
- 14) 山田就康, 西谷章 : 適切な評価関数と低次元化コントローラーをもつ H^∞ 制御理論による多自由度構造物の振動制御, 日本建築学会構造系論文集, No.462,pp21-29,1994.8

(1997 年 7 月 10 日原稿受理, 1997 年 9 月 5 日採用決定)