

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820073

研究課題名(和文)非ガウス性不規則励振を受ける非線形系の信頼性解析

研究課題名(英文)Reliability analysis of nonlinear systems subjected to non-Gaussian random excitation

研究代表者

土田 崇弘(Tsuchida, Takahiro)

東京工業大学・情報理工学研究科・助教

研究者番号：50707578

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,100,000円

研究成果の概要(和文)：非ガウス性不規則励振を受ける非線形系に対する応答・信頼性解析手法を開発することを目的とした。励振は、非ガウス分布とパワースペクトルという2つの情報を与えることによって、一般的な形で規定された。また、励振の非ガウス分布の対象に制限を設けず、強い非ガウス性を有する様々な分布を広く対象とすることで、様々な環境に置かれた多様な機械・構造物の設計等に広く適用可能な手法の開発を目指した。応答分布及び信頼性を解析的に求め、数値シミュレーションの結果と比較することによって、解析手法の有効性を示した。また、得られた解析結果をもとに、励振の非ガウス性が応答分布や信頼性に及ぼす影響を調べた。

研究成果の概要(英文)：The dynamic system subjected to non-Gaussian random excitation was studied. The excitation was prescribed by the non-Gaussian probability density and the power spectrum. First, equivalent non-Gaussian excitation method was proposed to obtain the moments up to the fourth order of the response of systems under non-Gaussian random excitation. The method yields the variance of the response exactly and estimate the skewness and kurtosis of the response accurately. Secondly, the method based on the minimum cross entropy principle was presented for obtaining the response distributions of nonlinear systems under non-Gaussian random excitation. Then, three types of a priori distributions were proposed. Finally, the method was proposed to obtain the the mean upcrossing rate of linear systems subjected to non-Gaussian random excitation. This method is valid for the non-Gaussian excitation with the asymmetric or heavy-tailed distribution and a wide range of the bandwidth.

研究分野：不規則振動

キーワード：不規則振動 信頼性解析 非ガウス性不規則励振 応答分布 平均閾値通過率 等価非ガウス励振化法

1. 研究開始当初の背景

機械や構造物は、地震動や風、波浪といった、再現性を持たず、時間とともに不規則に変動する励振を受ける。このとき、励振は確率過程でモデル化され、不規則振動問題として取り扱われてきた。特に、励振をガウス過程と仮定した応答・信頼性解析の研究報告は国内外を問わず数多く、系の応答特性や信頼性について、様々な知見が得られている。一方、実在する不規則励振の中には、車両に作用する垂直加速度や低階層構造物に加わる風圧など、顕著な非ガウス性をもつ不規則励振も存在する。そのような励振のもつ確率密度関数はガウス分布と比べて裾が大きく広がり、実現値として大きい値を取る確率が非常に高いものが多い。したがって、これらの励振を従来のようにガウス性と仮定して解析を行っても、信頼性の正しい評価ができないことが予想される。そのため、励振の非ガウス性を適切に考慮した解析が重要であると考えられるが、現在のところ、そのような応答・信頼性解析は、土木・海洋工学の分野で一部の問題に対して適用されているのみであり、一般的な非ガウス性励振を受ける系の応答特性や信頼性については、未だ十分に解明されていない。以上のような研究背景を踏まえ、本研究では、非ガウス性不規則励振を受ける系の応答・信頼性を解析的に評価する手法を開発する。

2. 研究の目的

非ガウス性不規則励振を受ける非線形系に対する応答・信頼性解析手法を開発することを目的とする。本研究では、励振を非ガウス確率密度関数とパワースペクトルという2つの情報を与えることによって、一般的な形で規定する。このような励振規定方法を採用することによって、多様な機械・構造物の設計等に広く適用可能な手法の開発を目指す。また、励振の非ガウス分布の対象に制限を設けず、ガウス分布とは形状が大きく異なり、強い非対称性や重い裾などの非ガウス性を有する様々な分布を広く対象とする。パワースペクトルについては、実在する多くの不規則励振が有する周波数依存性を考慮し、帯域幅と卓越振動数をパラメータにもつ狭帯域型パワースペクトルを用いる。以上の2つによって規定される励振を受ける非線形系の応答分布及び信頼性を解析的に求める手法を提案し、数値シミュレーションの結果と比較することによって、提案手法の有効性を検証する。また、得られた解析結果をもとに、励振の非ガウス性および帯域幅、卓越振動数が応答分布や信頼性に及ぼす影響を明らかにする。

3. 研究の方法

1. シミュレーションによる非ガウス性励振を受ける系の応答分布の調査

本研究では、非ガウス性不規則励振を受ける非線形系の応答・信頼性解析手法の開発を目的としたが、有効な解析手法の着想・検討のために、非ガウス性励振を受ける非線形系の応答分布を数値計算で求め、得られた結果をもとに励振の分布形状とパワースペクトルの違いが応答分布に及ぼす影響について調査を行った。この際、励振の非ガウス分布やパワースペクトルのパラメータの範囲を、広範囲を対象として計算を行い、解析手法の開発時に考慮すべき応答特性を整理した。

2. 応答分布推定手法の開発

1.の数値計算による調査に続き、非ガウス性不規則励振を受ける非線形系の応答分布を求める解析手法の開発・検討を進めた。手法の開発に際しては、ガウス性励振を受ける非線形系の非ガウス応答分布推定手法を応用した。具体的には、予め応答分布の関数形を仮定し、その関数に含まれる未知のパラメータを、応答のある次数までのモーメントの情報から決定する方法を採用することとした。この際、応答のモーメントについては、励振と系の支配方程式からモーメント方程式を立て、これを解くことによって求めた。また、多峰性入力分布の場合などに対応するため、最小クロスエントロピー法による確率密度関数推定法も用いた。

以上の手法を用いて、励振の非ガウス分布とパワースペクトルの帯域幅を複数変化させて応答分布を求め、その結果を数値計算で得た結果と比較することにより、手法の有効性及び適用可能な非ガウス性励振の特徴を検証した。系の信頼性解析は、応答分布推定の結果を用いて行われるため、正しく信頼性を評価するためには、応答分布の裾の高精度な推定が不可欠となる。したがって、解析によって得られた応答分布の、とりわけ裾の部分について、数値計算結果との詳細な比較検討を行った。

3. 平均閾値通過率の導出

2.で開発した手法を用いて応答分布を求め、その応答分布をもとに、非ガウス性不規則励振を受ける線形系の応答の平均閾値通過率を導出した。この信頼度関数についても数値計算結果と比較・検討し、解析手法の妥当性を確認した。

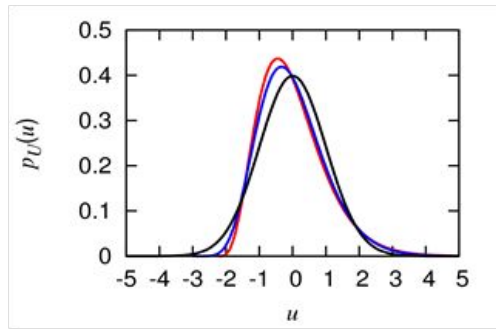
4. 励振の分布やパワースペクトル特性の変化が系の信頼性に与える影響の考察

3.で導出した平均閾値通過率をもとに、励振の分布形状やパワースペクトルの帯域幅の変化が、系の信頼性に与える影響を考察した。

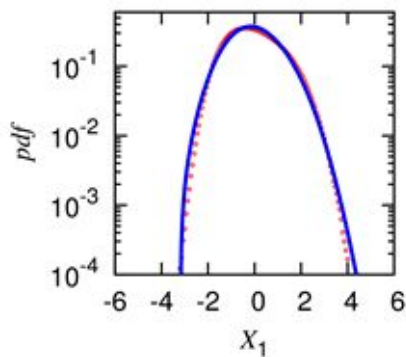
4. 研究成果

混合ガウスモデルによる応答分布の推定

モーメント方程式と混合ガウスモデルを組み合わせることで、確率密度関数とパワースペクトルによって定められた非ガウス性入力を受ける非線形系の定常応答の確率密度関数を解析的に求める手法を提案した。解析例を通して、本手法が、広い範囲の入力の帯域幅の変化および強い非対称性を有する入力分布に対し、精度良く応答分布を推定できることを示した。解析結果の一例を図1に示す。



(a)



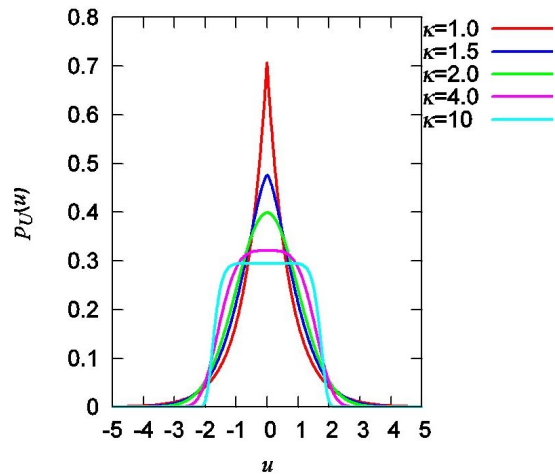
(b)

Fig.1 (a) Excitation distribution and (b) response distribution (—: present method, ●: Monte Carlo simulation)

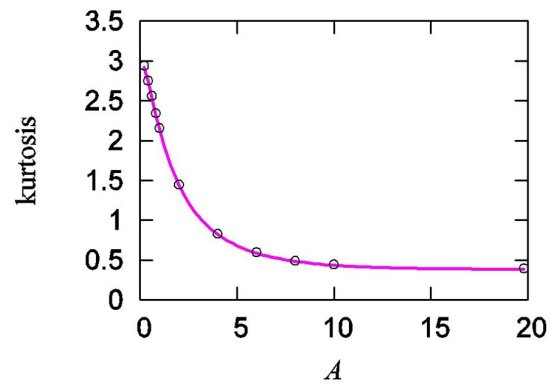
等価非ガウス励振化法

非ガウス性不規則励振を受ける振動系の4次までの応答モーメントを求めるために、等価非ガウス励振化法という手法を開発した。非ガウス性励振は確率微分方程式によって記述されるため、その励振の支配方程式と系の運動方程式から、応答のモーメント方程式を導出することができる。しかし、一般的な非ガウス分布を有する励振を対象とするとき、励振の確率微分方程式に含まれる拡散係数が複雑な形となり、導出されたモーメント方程式は一般に閉じた形とならない。そこで、閉じたモーメント方程式を得るために、もとの拡散係数を近似的に等価拡散係数で置き換える手法を提案した。等価拡散係数の二乗は2次多項式で与えられる。提案手法を用いるとき、応答分散は厳密に得られる、また、

等価的な励振分布の歪度と尖度がもとの励振分布の歪度と尖度に非常に良く一致するため、応答の歪度と尖度についても、様々な非ガウス分布形状と帯域幅 A をもつ励振の場合で、精度良く得られる。解析例を図2に示す。



(a)



(b)

Fig.2 (a) Excitation distribution and (b) kurtosis of stationary displacement response (—: present method, ○: Monte Carlo simulation)

最小クロスエントロピー法による応答分布解析

励振の非ガウス性や系の非線形性により、応答分布が強い非ガウス性(例えば多峰分布)を示すとき、モーメントの情報だけでは、応答の非ガウス性の特徴を十分に捉えられない可能性がある。このような場合には、モーメントだけでなく、より多くの情報を考慮しながら応答分布を推定する必要がある。本研究では、そのような状況に対応するため、最小クロスエントロピー法によって、非ガウス性励振を受ける非線形系の応答分布を求める方法を提案した。応答モーメントの情報に加え、応答分布のおよその形状などに関する先験情報を有しているとき、その先験情報は先験確率分布として反映され、応答モーメントに関する拘束条件を満足する中で、先験確率分布とのクロスエントロピーを最小にす

る分布が応答分布の推定結果として求められる。この際、非ガウス励振系に対する有効な先験確率分布の与え方は知られていなかったため、本研究では、事前の調査で得た、非ガウス励振系の応答分布特性と、励振と系の帯域幅比の関係についての知見をもとに、その帯域幅比に応じた先験確率分布の与え方を提案した。この手法は、推定する応答分布の関数形の仮定を必要としないため、多様な形状をもつ非ガウス励振分布の場合に適用可能である。計算例として、図3に示すバイモーダル分布入力の場合で解析を行い、本提案手法の妥当性を示した。

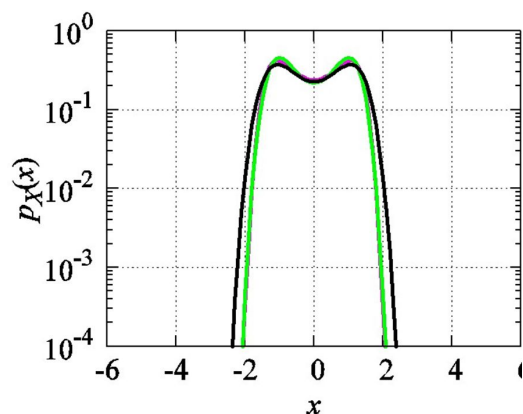


Fig.3 Excitation distribution (—) and analytical result of response distribution (—)

平均閾値通過率の解析

非ガウス性不規則入力を受ける線形系の定常応答の平均閾値通過率を解析的に求める手法を提案した。この手法では、等価非ガウス励振化法を利用して得た4次までの応答モーメントを基に、応答をエルミートモーメントモデルで表すことで定常応答分布を求める。また、その定常応答分布を用いて平均閾値通過率を求める。解析結果とモンテカルロ・シミュレーションの結果の比較により、本手法を用いることによって、非対称あるいは重い裾の非ガウス分布と広範囲の帯域幅を有する入力の場合でも、精度良く平均閾値通過率を求められることを確認した。解析例を図4に示す。

解析結果より、入力が狭帯域であるほど、入力分布の違いが平均閾値通過率に与える影響が大きくなることを確認した。そのため、特に入力の帯域幅が狭い場合には、入力の非ガウス性を適切に評価して解析を行うことが、正確な信頼性評価のためには重要であると考えられる。

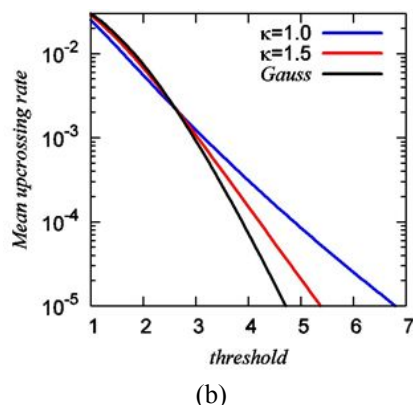
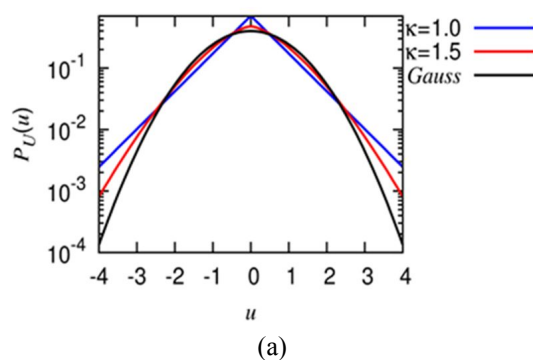


Fig.4 (a) Excitation distribution and (b) analytical results of mean upcrossing rate of stationary displacement response

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)

1. 土田崇弘, 木村康治, 等価非ガウス励振化法を用いた非ガウス不規則励振系の応答モーメントの解析, 日本機械学会論文集, 査読有, 81, 823, DOI:10.1299/transjsme.14-00410, 2015.
2. 混合ガウスモデルを用いた非ガウス性不規則入力を受ける非線形系の応答分布解析, 馬場湧太, 土田崇弘, 木村康治, 日本機械学会論文集, 査読有, 81, 823, DOI:10.1299/transjsme.14-00632, 2015.
3. Equivalent Non-Gaussian Excitation Method for a Linear System Subjected to a Non-Gaussian Random Excitation, Takahiro Tsuchida and Koji Kimura, Theoretical and Applied Mechanics Japan, 査読有, 63, 81-89, 2015.
4. 等価非ガウス励振化法の非対称型分布をもつ非ガウス性不規則励振を受ける振動系への適用, 土田崇弘, 馬場湧太, 木村康治, 日本機械学会論文集, 査読有, 81, 829, DOI:10.1299/transjsme.15-00163, 2015.
5. 土田崇弘, 木村康治, 最小クロスエントロピー法による非ガウス不規則励振系の応答解析, 日本機械学会論文集, 査読有,

〔学会発表〕(計 11 件)

1. Equivalent Non-Gaussian Excitation Method for Response Moment Calculation of Systems Under Non-Gaussian Random Excitation, Takahiro Tsuchida and Koji Kimura, In: Proceedings of 23rd International Conference on Nuclear Engineering, Makuhari Messe, Chiba, Japan, 査読有, ICONE23-1591, 2015.
2. Simulation of Narrowband Non-Gaussian Processes Using Envelope Distribution, Takahiro Tsuchida and Koji Kimura, In: Proceedings of 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, Coast Plaza Hotel & Suites, Vancouver, Canada, 査読有, 331, 2015.
3. 土田崇弘, 木村康治, 等価非ガウス励振化法による不規則励振系の応答解析, 日本機械学会 機械力学・計測制御部門 Dynamics and Design Conference 2014, 慶応義塾大学, 横浜市, アブストラクト集, USB 講演論文集, 325, 2014.
4. 馬場湧太, 土田崇弘, 木村康治, 混合ガウスモデルを用いた非ガウス性不規則入力を受ける非線形系の応答解析, 日本機械学会 機械力学・計測制御部門 Dynamics and Design Conference 2014, 慶応義塾大学, 横浜市, アブストラクト集, USB 講演論文集, 323, 2014.
5. 土田崇弘, 木村康治, 等価非ガウス励振化法による非ガウス性不規則励振を受ける線形系の応答解析, 第 63 回理論応用力学講演会, 東京工業大学, 目黒区, USB 講演論文集, GS04-01-01, 2014.
6. 上原大暉, 土田崇弘, 木村康治, 狭帯域非ガウス性不規則入力を受ける 1 自由度線形系の応答特性, 日本機械学会 関東支部第 21 期総会・講演会, 横浜国立大学, 横浜市, 講演論文集, 10605, 2015.
7. 土田崇弘, 青木勇人, 木村康治, 最小クロスエントロピー法による非ガウス不規則励振系の応答解析, 日本機械学会 機械力学・計測制御部門 Dynamics and Design Conference 2015, 弘前大学, 弘前市, アブストラクト集, USB 講演論文集, 149, 2015.
8. 西坂直登, 土田崇弘, 木村康治, ガウス性ホワイトノイズと不規則パルス励振を同時に受ける非線形系の応答解析—励振強度比と応答分布の関係—, 日本機械学会 機械力学・計測制御部門 Dynamics and Design Conference 2015, 弘前大学, 弘前市, アブストラクト集, USB 講演論文集, 148, 2015.
9. 上原大暉, 土田崇弘, 木村康治, 帯域幅と卓越振動数を考慮した非ガウス性不規

則入力を受ける線形系の応答分布, 日本機械学会 機械力学・計測制御部門 Dynamics and Design Conference 2015, 弘前大学, 弘前市, アブストラクト集, USB 講演論文集, 147, 2015.

10. 土田崇弘, 木村康治, 最大エントロピー法を用いた非白色不規則励振を受ける非対称非線形系の応答解析, 日本機械学会 関東支部第 22 期総会・講演会, 東京工業大学, 目黒区, 講演論文集, OS1101, 2016.
11. 上原大暉, 土田崇弘, 木村康治, 相互相関関数を用いた狭帯域非ガウス性不規則入力を受ける 1 自由度線形系の応答特性に関する研究, 日本機械学会 関東支部第 22 期総会・講演会, 東京工業大学, 目黒区, 講演論文集, OS1102, 2016.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

土田 崇弘 (TSUCHIDA Takahiro)
東京工業大学 情報理工学研究所, 助教
研究者番号: 50707578

(2) 研究分担者

()
研究者番号:

(3) 連携研究者

()
研究者番号: