

CT装置の回転バランス調整技術

Rotation Balancing Technology for CT Scanners

山中 健史

■ YAMANAKA Takeshi

豊嶋 毅

■ TOYOSHIMA Takeshi

信藤 康孝

■ SHINDO Yasutaka

CT (Computed Tomography : コンピュータ断層撮影) 装置では、短時間で広範囲の高精細データを収集するため、検出器の多列化と回転速度の高速化が進められている。しかし、多列化と高速化は架台振動を増大させる要因となり、回転バランス調整を含め、振動対策が不可欠になっている。

東芝は、CT装置の振動を低減するため、回転バランス調整アルゴリズム“影響波法”を考案し、そのアルゴリズムを実装したバランス調整システムを開発した。このアルゴリズムは回転アンバランスだけでなく、回転によって発生する全ての振動を対象とするもので、高精度の回転バランス調整が容易にできるようになった。

Recent computed tomography (CT) scanners have become more advanced in terms of increases in the number of rows of detectors and faster rotation speeds, in order to rapidly gather a wide range of high-definition data. However, as multiple rows of detectors and high-speed rotation are a factor in increased gantry vibration, the introduction of countermeasures against vibration such as rotation balancing has become necessary to secure the stability of CT scanners.

Toshiba has developed a rotation balancing algorithm that can reduce gantry vibration in consideration of not only rotation imbalance but also all of the vibration generated by vibration, using an influence wave method. We have also developed a rotation balancing system incorporating this algorithm, which allows highly precise rotation balancing of CT scanners to be easily performed.

1 まえがき

CT装置は、人体の断面像を撮影でき、短時間で多くの情報を得られることから、画像診断によく用いられている。ヘリカルスキャン技術や検出器の多列化により、臓器の構造だけでなく、動きのある臓器も3次元的に描画できる⁽¹⁾。近年では、複数枚の断面を1度に撮影できるマルチスライスCTを進化させた、320列の断面像を同時に収集できるCT装置 Aquilion ONETMが開発されている⁽²⁾。この装置では、1回転のスキャンで脳や心臓全体を撮影できるため、体動の影響が少ない撮影ができるようになったものの、回転部質量が増加する。一方、体動効果の低減や時間分解能の向上などの理由から、CT装置の回転速度は年々高速化の傾向にあり、現在1回転にかかる時間は0.3秒台にまで短くなっている。多列化による回転部質量の増加と高速回転化は、装置振動を増大させる要因となる。

ここでは、CT装置の振動を低減するため考案した回転バランス調整技術について述べる。

2 CT装置の振動

CT装置の外観を図1に示す。CT装置は、中央部分に穴があいたガントリ、患者を載せて撮影位置まで移動する寝台、及び画像再構成や表示を行うコンソールで構成されている。



図1. CT装置 Aquilion ONETM — CT装置はガントリ、寝台、及びコンソールで構成され、X線を利用して人体内部の構造を画像化する。
Aquilion ONETM CT scanner

ガントリは架台と呼ばれ、そのカバーの中は図2に示すように、X線管などを搭載した回転部とそれを支える固定部で構成されている。架台の回転部には、X線管やX線検出器といった様々な質量の大きいものが搭載されており、これらが高速で回転する。したがって、回転バランスや剛性バランスのわずかなずれが大きな装置振動を発生させる。この装置振動は、撮影画像への悪影響があるだけでなく、患者の負担や不安の原因にもなる。

また、CT装置の回転速度は年々高速化の傾向にあり、今後更なる高速化も見込まれている。回転アンバランスによる振動

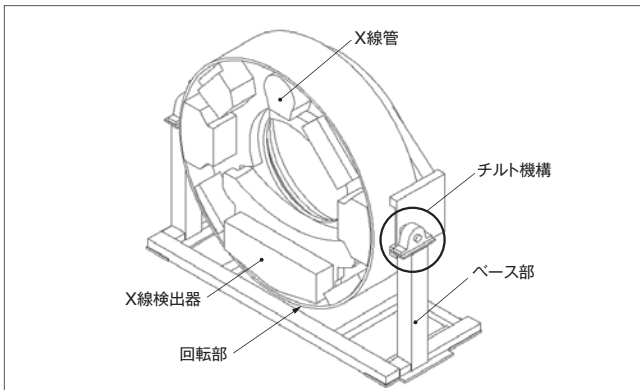


図2. 架台の内部 — 架台の回転部には、X線管やX線検出器などの様々な質量の大きいユニットを搭載している。
Structure of gantry

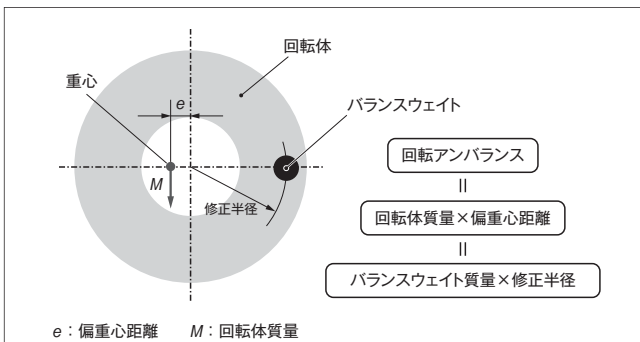


図3. バランスウェイトによる回転バランス調整 — 偏重心を打ち消すようにバランスウェイトを配置することで、回転アンバランスを修正する。
Rotation balancing using balancing weights

は、回転速度に対して二次関数的に増加することもあり、振動対策の重要性は年々増加している。このような高速回転による振動エネルギーの増大や、チルト機構を持つことによる剛性低下など高機能を追求するほど振動対策が必要となっている。

この装置振動を低減させるために、架台の高剛性設計を行っているが、剛性向上による対策だけでは装置の質量やコストが増加してしまう。そのため、高剛性化設計と併せて、回転バランス調整による振動低減が重要となる。

CT装置の回転バランス調整では、バランスウェイトを用いた手法を採用している。この手法では、図3に示すように、回転体内部に適切なウェイトを設置して、回転バランスを調整する。

3 回転機械のバランス調整技術

車載用モータや蒸気タービン発電機のような回転機械の回転バランスを、バランスウェイトを用いて調整する方法として、影響係数法が一般的に用いられる^{(3),(4)}。影響係数法では、実際の据付状態で調整できるため、温度や負荷などの設置環境による振動特性の変化も考慮して、回転アンバランス振動を

表1. 影響係数法によるバランス調整方法

Rotation balancing methods using influence coefficient method

	単一速度影響係数法	多速度影響係数法	多速度多修正面影響係数法
方法	一つの回転数での振動ベクトルに着目して、テストウェイトの影響係数により調整する。	振動が顕著になるいくつかの回転数に着目して、テストウェイトの影響係数により調整する。	振動が顕著になるいくつかの回転数と計測点に着目して、テストウェイトの影響係数により、多面調整を行う。
適用範囲	<ul style="list-style-type: none"> 危険速度があまり問題にならないロータ 一次危険速度だけが関係するロータ 危険速度が互いに十分離れており、モードが単純なロータ 	<ul style="list-style-type: none"> いくつかの危険速度はあるが、それらが互いに比較的分離しており、モードも単純なロータ 	<ul style="list-style-type: none"> 危険速度が多くあり、モードも複雑なロータ
対象装置例	<ul style="list-style-type: none"> 一般小型機械 モータ、ポンプ 小型タービン、フロア 	<ul style="list-style-type: none"> 自家発電用タービン、発電機 中型事業用タービン、発電機 コンプレッサ、フロア 	<ul style="list-style-type: none"> 大型事業用タービン 大型ガスタービン

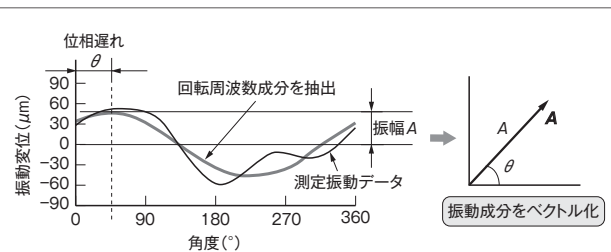


図4. 回転アンバランスのベクトル化 — 振動センサで得られた波形から回転周波数成分を抽出し、ベクトルに変換する。
Vectorization of rotation imbalance

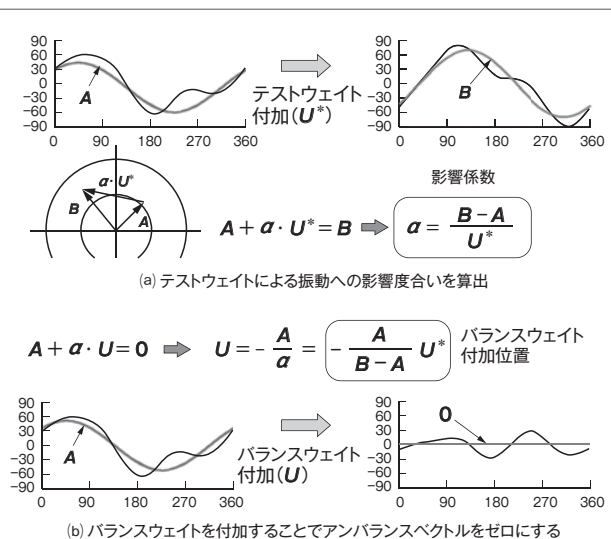


図5. 影響係数を用いた回転バランス調整 — 影響係数法では、アンバランスが振動に及ぼす影響度合いを利用して、回転バランスを調整する。
Rotation balancing using influence coefficient method

減少できる。影響係数を利用した調整方法には、表1に示すような種類があり、対象装置の特性に応じて適切な調整方法を選択する必要がある⁽⁵⁾。

影響係数法の基本的な考え方である、単一速度影響係数法について述べる。単一速度影響係数法では、振動センサで測定した振動データに対し、フーリエ変換などの処理をすることによって回転周波数成分を抽出し、それを振動ベクトルに変換する(図4)。次に、テストウェイトを用いて、回転アンバランスが振動に及ぼす影響度合いである、影響係数を求める。この影響係数は位相変化も表現するために複素数となる。また、バランスウェイトが振動に及ぼす影響は、バランスウェイトに影響係数を掛けたもので表現できる。そこで、現状の振動ベクトルをゼロにするような影響ベクトルを考え、そこからバランスウェイトの調整位置を求めることができる⁽⁶⁾(図5)。

4 CT装置に対応した調整方法

従来はCT装置の回転バランスも影響係数法を利用して調整していたが、単純に回転アンバランスをなくすだけでは十分な振動低減ができなくなっている。これは、質量の増加や高速化によって振動エネルギーが増えたというだけでなく、架台振動が回転周波数成分だけで構成されていないという、CT装置の振動特性も原因として挙げられる。CT装置の架台振動の要因は回転アンバランスだけでなく、回転体の保持部の接触や回転体に搭載した多数のファンなど複数あり、架台振動には回転周波数成分以外の振動成分が含まれる。

影響係数法では、振動をベクトルで表現するため、回転周波数成分だけを対象とした回転バランス修正であるといえる。そのため、CT装置のバランス修正に影響係数法を用いた場合、高次成分の影響により調整後に振動振幅が増加してしまうこともあった(図6)。そこで、回転周波数成分だけでなく振動全体を考慮した、新しいアルゴリズム“影響波法”を考案した。

影響波法では、バランスウェイト取り付け前後の波形の差から、バランスウェイトの質量と取り付け位置を引数とする影響波関数を求める(図7)。従来の影響係数法と比較すると、バランスウェイトの振動への影響に注目する点では同じであるが、

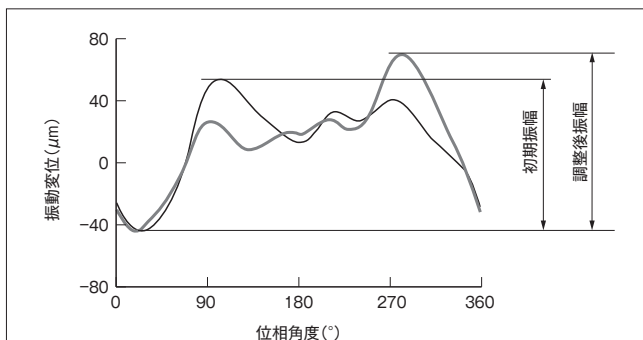


図6. 影響係数法によるCT装置のバランス調整例 — 調整後に振動振幅が増加する場合がある。

Examples of rotation balancing using influence coefficient method

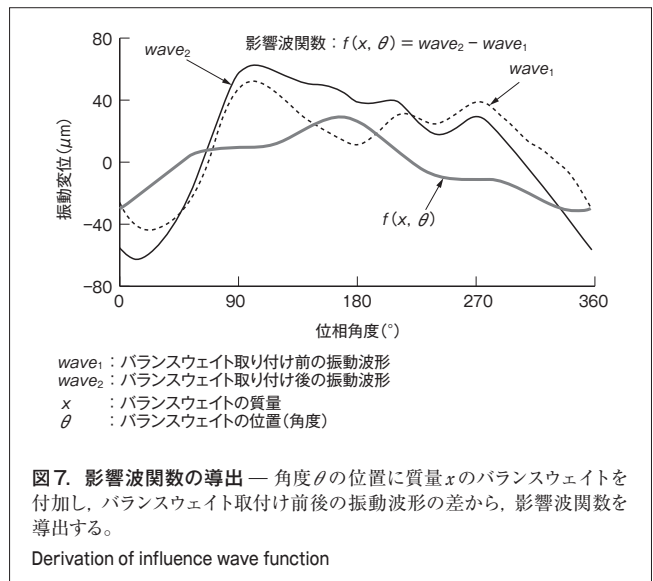


図7. 影響波関数の導出 — 角度 θ の位置に質量 x のバランスウェイトを付加し、バランスウェイト取り付け前後の振動波形の差から、影響波関数を導出する。

Derivation of influence wave function

影響係数法が振動の回転周波数成分だけを対象にしているのに対し、影響波法では、高次成分も含む振動全体を関数化しているという点が異なる。

ある状態で測定した振動 $wave_1$ を測定振動とすると、その状態にバランスウェイトを取り付けたときの予想振動 $g(x, \theta)$ は、影響波関数 $f(x, \theta)$ を用いて、式(1)で表現できる(図8)。

$$g(x, \theta) = wave_1 + f(x, \theta) \quad (1)$$

この予想振動の振幅を最小にするバランスウェイトの質量と位置を探索することで、求めるバランスウェイトの質量と取り付け位置を算出することができる。

このアルゴリズムの特長は、高次成分の影響も含めた振動全体を考慮して最適修正値を探索するため、バランスウェイトを用いた調整方法での最適修正位置を網羅的に求めることができることである(図9)。

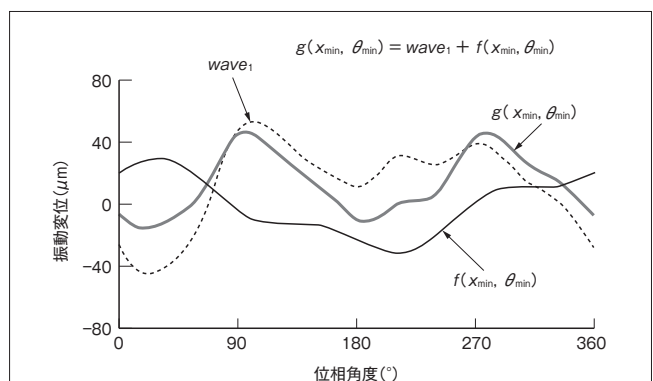


図8. 影響波法によるバランスウェイト配置の算出 — 影響波法によって予想振動を求めることができ、その振幅を最小にするバランスウェイト (x, θ) の配置を算出する。

Calculation of balancing weight locations using influence wave method

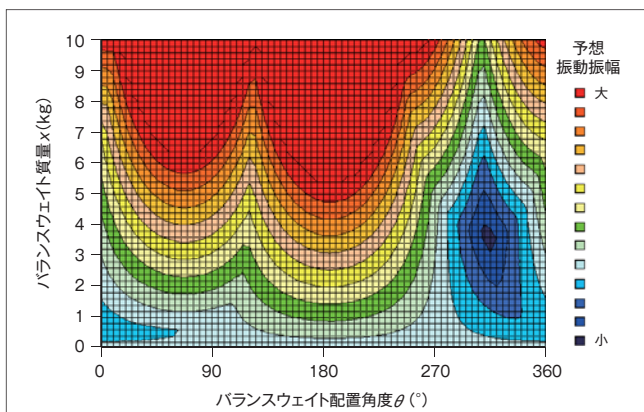


図9. 最適修正位置の探索例 — 影響波法では、予想振動の振幅がもっとも小さくなるバランスウェイトの配置を探索する。

Example of searching for optimum location of weights

5 CT装置用バランス調整システム

新アルゴリズム影響波法を実装したバランス調整システムを

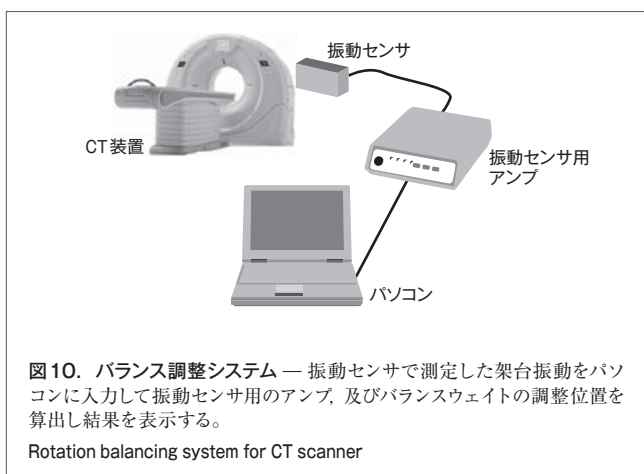


図10. バランス調整システム — 振動センサで測定した架台振動をパソコンに入力して振動センサ用のアンプ、及びバランスウェイトの調整位置を算出し結果を表示する。

Rotation balancing system for CT scanner

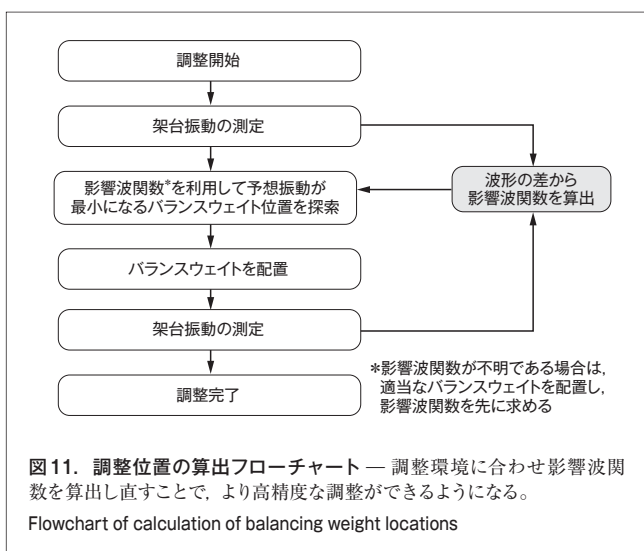


図11. 調整位置の算出フローチャート — 調整環境に合わせて影響波関数を算出し直すことで、より高精度な調整ができるようになる。

Flowchart of calculation of balancing weight locations

開発した。このシステムは、架台振動を測定する振動センサ、振動センサ用のアンプ、及びバランスウェイトの調整位置算出と結果表示を行うパソコンで構成されている(図10)。調整位置算出のためのフローを図11に示す。影響波関数は事前に求めたものを利用することも可能であるが、調整環境で改めて算出することで、より高精度な調整ができるようになる。

開発したシステムは、生産ラインでの調整時や、現地据付時、ユニット交換時などに広く用いている。特に、現地据付では、設置する床の状態も振動の高次成分に影響を及ぼすため、振動全体を最適化する影響波法アルゴリズムが有効となっている。

6 あとがき

CT装置の特性を考慮した回転バランス調整アルゴリズムを考案し、そのアルゴリズムを実装したバランス調整システムを開発した。これは、回転周波数成分だけでなく、振動全体を最適化する新しい調整システムである。

今後も、CT装置の架台振動の更なる低減を目指すとともに、調整対象や設置環境にかかわらず、容易かつ高精度に調整を行えるシステム開発に取り組んでいく。

文献

- 1) 内蔵啓幸 他. 3大疾患の診断に活躍するCT装置. 東芝レビュー. 62, 1, 2007, p.11-15.
- 2) 風間正博 他. 3大疾患の診断と治療に貢献するCT装置 Aquilion ONE™. 東芝レビュー. 66, 7, 2011, p.11-14.
- 3) 山本敏男 他. 回転機械の力学. 東京, コロナ社, 2001, 378p.
- 4) 高田 智 他. 高速・高精度バラシングマシンの開発. デンソーテクニカルレビュー. 6, 2, 2001, p.45-52.
- 5) 振動技術研究会. ISO基準に基づく機械設備の状態監視と診断(振動 カテゴリーII). 東京, 富士ゼロックスクロスワークス(株), 2005, 263p.
- 6) 三輪修三 他. 回転機械のつりあわせ. 東京, コロナ社, 1976, 256p.



山中 健史 YAMANAKA Takeshi

生産技術センター メカトロニクス開発センター研究主務。
製造設備の要素技術開発に従事。日本機械学会会員。
Mechatronics Development Center



豊嶋 毅 TOYOSHIMA Takeshi

生産技術センター メカトロニクス開発センター主任研究員。
製造設備の要素技術開発に従事。日本ロボット学会会員。
Mechatronics Development Center



信藤 康孝 SHINDO Yasutaka

東芝メディカルシステムズ(株) CT開発部 機構設計担当主任。
X線CTスキャナの設計・開発に従事。日本機械学会会員。
Toshiba Medical Systems Corp.