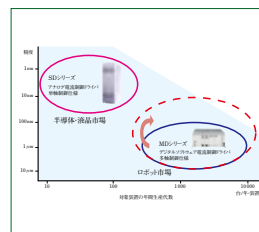
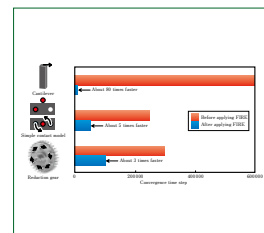
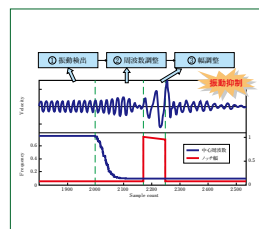
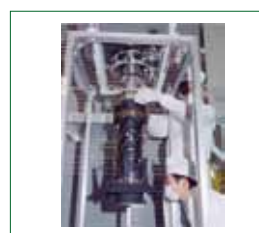


Special Section 情報・制御特集



特別寄稿

小惑星探査機「はやぶさ」搭載サンプル採取機構	矢島 暁	1
------------------------	------	---

情報・制御特集

論文・報告	適応ノッチフィルタの開発および XY ステージへの適用	小木曾 太郎, 塚原 真一郎	7
	陽子線治療装置用スキャン制御システムの開発	井上淳一	13
	高安定度電磁石電源のデジタル制御	一色 翼	17
技術解説	デジタルハードウェア電流制御の開発	安武知治	21
	M7 制御プラットフォームの搬送制御システムへの適用	福島 弘	23
	M7 制御プラットフォーム研削盤用 CNC への適用	島田 昇	25
	運行管理システム eSNav	吉田貴志	27

論文・報告

くりこみ群分子動力学法を用いた高速構造緩和手法	広瀬良太, 大西良孝, 市嶋大路	29
-------------------------	------------------	----

新製品紹介

気体検知式 LPG 残量警報		33
----------------	--	----

小惑星探査機「はやぶさ」搭載サンプル採取機構

Sampler Mechanism of Hayabusa Spacecraft for Asteroid Probing

●矢島 暁*
Satoru YAJIMA



サンプル採取機構 ホーン部
Hayabusa Sampler (Horn part)

©JAXA

小惑星探査機「はやぶさ」は、数々の苦難を乗り越え、2010年6月13日に無事地球への帰還を果たした。

このニュースは各報道機関にて大きく取り上げられ多くの国民に感動を与えたが、このはやぶさには当社が開発に参画した小惑星サンプル採取機構が搭載されていた。

小惑星サンプル採取機構に課せられたミッションは、(1)小惑星に弾丸を撃ち込み破碎された表層部（サンプル）を衛星内部に導き、(2)衛星内部でサンプルを分離しキャッチャと呼ばれる容器に格納し、(3)キャッチャを回収カプセルに搬送し真空密封を行う、という非常に複雑かつ高度なものであったが、これらのすべての動作が成功し所定の機能を満足したことが確認されている。また、回収カプセル内には小惑星由来の微量の粒子が入っていたことも確認されており、現在独立行政法人宇宙航空研究開発機構にて詳細な分析が行われている。

“Hayabusa,” which is a Japanese spacecraft for asteroids probing, successfully returned to Earth on June 13, 2010 after overcoming various challenges. This news was taken up by the mass media and made a deep impression on the Japanese people. The Hayabusa is equipped with a sampler mechanism that collects fragments of surface materials of an asteroid. This sampler mechanism is a key component created in the development program in which we participated. The main missions assigned to this sampler mechanism are: 1) to collect fragments (samples) of surface materials of an asteroid that was broken by a projectile shot from the spacecraft, 2) to separate the samples in the craft and store them in the container called the catcher, and 3) to insert the catcher into the re-entry capsule and seal up the samples under vacuum conditions in this capsule. Although these tasks were very complicated and required sophisticated technologies, it was confirmed that they were completed successfully and fulfilled the required functions. It was also confirmed that small particles originating from the asteroid were found in the capsule. The Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) is now performing detailed analysis of these particles.

1 まえがき

はやぶさは、独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所(JAXA)が開発した工学実験衛星であり、太陽系小惑星イトカワに着陸し、表層部(サンプル)を採取し地球に持ち帰ることを目的として、2003年5月9日之内浦宇宙空間

観測所より打ち上げられた。図1にははやぶさの外観写真を、図2にははやぶさの構成および主仕様を示す。はやぶさは打上げ後にリアクションホイール故障、地球との通信断絶、イオンエンジン故障など種々のトラブルに見舞われたことから、地球帰還は当初予定の2007年より延期されたが、これらのトラブルを克服し2010年6月13日に無事地球帰還を果たし

表1 はやぶさの打上げから地球帰還までの履歴
History of Hayabusa from launch to return to the Earth

2003年	5月	M-V-5号ロケットにより打上げ
2004年	5月	地球スイングバイ 小惑星イトカワに向かう
2005年	9月	小惑星イトカワまで20kmの地点に到着
2005年	11月	小惑星イトカワに降下, 世界初の小惑星軟着陸に成功 2回タッチダウン後離脱
2005年	12月	地球との交信断絶
2006年	1月	地球との交信復活
2007年	1月	サンプル採取機構の回収カプセルへの搬送成功
2010年	4月	地球帰還に向け軌道修正
2010年	6月	地球帰還 サンプル回収
2010年	11月	採取した微粒子が小惑星イトカワ由来のものと判明

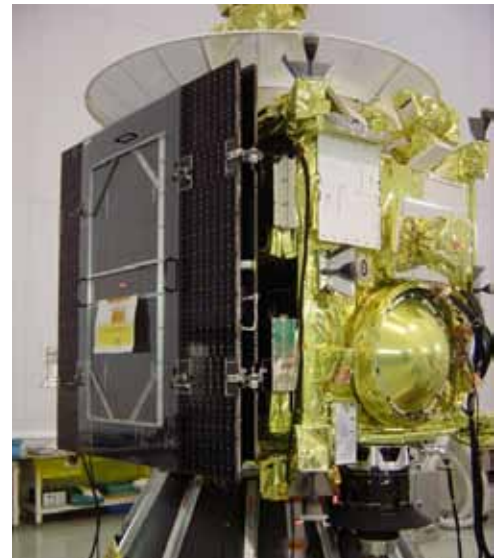
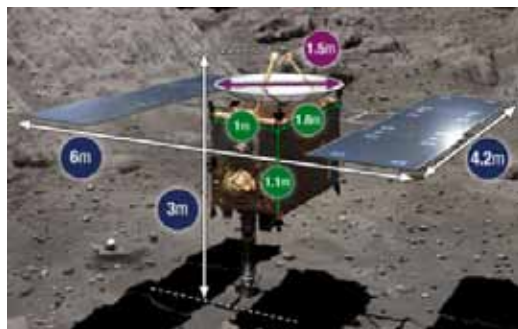


図1 はやぶさ外観写真
Photograph of Hayabusa spacecraft



©JAXA



©池下章裕



©JAXA

寸法: 6m×4.2m×3 m
(太陽電池パドル、サンプラーホーン展開時)
1 m×1.6m×1.1m(衛星本体)
質量: 510kg(打ち上げ時、燃料質量を含む)

図2 はやぶさの構成及び主仕様
Configuration and main specifications of Hayabusa spacecraft

た。

また、地球に帰還した回収カプセル内部からは微粒子が発見され、これらはイトカワ由来のものと断定され、現在JAXAにて詳細な分析が行われている。表1に、はやぶさの打上げから地球帰還までの主要イベントの履歴を示す。

はやぶさにおける工学的検証項目は以下の4点であり、当社はJAXAおよび日本電気株式会社と共同で(4)のサンプル採取技術確立のためのサンプル採取機構の開発を行った。

- (1) 惑星間航行用のイオンエンジンの実証
- (2) 光学情報に基づく自動・自律的な位置制御システムの確立

- (3) 惑星間軌道からのカプセル再突入、回収技術の確立

- (4) 小惑星表面からのサンプル採取技術の確立

本報では、このサンプル採取機構の詳細および軌道上での実績について報告する。

2 サンプル採取機構の詳細

2.1 要求機能

開発に当たり、小惑星サンプル採取機構に対して提示された要求機能を以下に示す。

- (1) 小銃(プロジェクタ)より発射されるプロジェタイルにより小惑星表面を破碎すること

表2 サンプル採取機構の機能及び性能
Function and specification of sampler mechanism

機構	機能	性能 (数値はノミナル値)
サンプリング部	サンプルの捕集, 格納, 回収カプセルまでの搬送, サンプルの真空シール	寸法: 290 mm(W)×410 mm(H)×280 mm(L) 質量: 3.1 kg
① サンプルキャッチャ機構	捕集したサンプルの格納	最大粒径: 10 mm のサンプル格納 サンプル収納容積: 70 cm ³
② サンプル分離機構	捕集したサンプルのサンプルキャッチャ機構内での分離	サンプル分離室数: 2 室 回転方式による採取室の切替え
③ サンプル捕集チューブ退避機構	サンプル捕集後の, サンプルキャッチャ機構からの回転チューブの退避	退避ストローク: 72 mm
④ サンプル搬送機構	・ サンプルキャッチャ機構およびサンプルキャッチャ機構内に格納されたサンプルの, 回収カプセル内真空コンテナまでの搬送 ・ サンプルキャッチャ機構搬送後の搬送ばね力の解除 ・ ラッチ・シール機構のアクチュエータ駆動用電源ワイヤーの切断	搬送ストローク: 161 mm
⑤ ラッチ・シール機構	・ 真空コンテナに対しての真空シール ・ 衛星からの回収カプセル分離後, 地上での回収とサンプル取出しまでの真空コンテナの気密保持	真空コンテナ内圧力レベルの保持: 1.33 Pa(1×10 ⁻² torr) 以下 (空気分圧レベル)
ホーン部	採取したサンプルをサンプリングまで導く	寸法: φ 350 mm×1 000 mm (L) 質量: 4.9 kg
① ホーン機構	衛星下面から 1000 mm の位置において, 破砕した表層の破片 (サンプル) を捕集しキャッチャに導く	ホーン下部開口径: φ 150 mm 構体下面からの長さ: 1000 mm

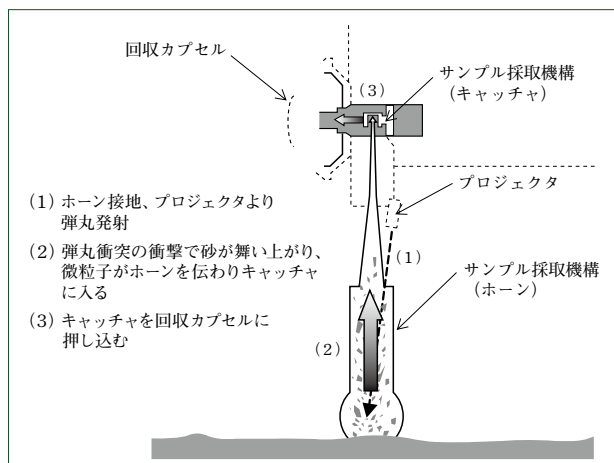


図3 撃ちこみ式サンプリング方式
Sampling technique by firing a bullet

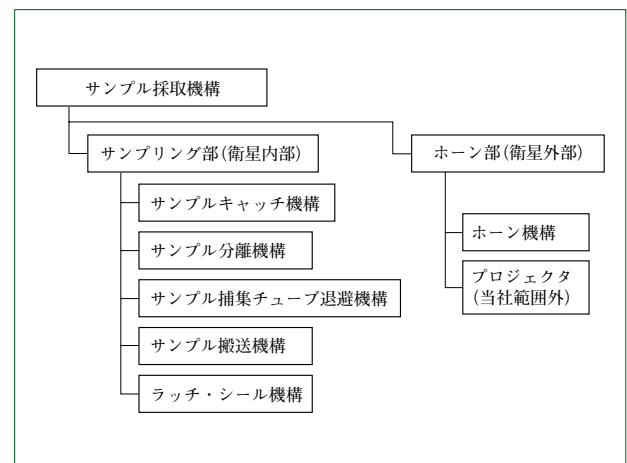


図4 サンプル採取機構の構成
Construction of sampler mechanism

(2) 破砕され飛散した小惑星表層の破片(サンプル)を筒状のホーンを介して衛星内部の捕集容器(キャッチャ)に導くこと
(3) サンプルを捕集容器(キャッチャ)内に2回に振り分け格納すること
(4) サンプルの格納されているキャッチャを回収カプセル内の真空コンテナに搬送し、コンテナ内に収容し固定すること
(5) 真空コンテナをシールし、コンテナ内の気密を保つこと
(1)の小惑星表面破砕のプロジェクトルおよびプロジェクトル開発はJAXAにて実施された。開発時は小惑星の表面状態は不明であったことから、いかなる表面状態にも対応可能であり、かつ微小重力環境下で成立する撃込み式サンプリング方式が開発された。図3に、撃込み式サンプリング方式を示す。本方法はプロジェクトルをプロジェクトルより撃ち出し、小惑星表面を破砕させ舞い上がってくるサンプルを採取するという方法であり、複数回にわたる無重力実験により十分な収集能力があることが確認された⁽¹⁾。その他(2)から(5)につい

ては当社にて開発を行った。

2.2 構成および機能・性能

図4に、2.1の要求機能を受け開発したサンプル採取機構の構成を、表2に機能および性能を、図5および図6にサンプル採取機構外観図を示す⁽²⁾。

サンプル採取機構は衛星内部に設置されるサンプリング部と衛星外部に設置されるホーン部により構成される。サンプル採取機構の主な特長を以下に示す。

- (1) 高い動作信頼性 (NEA (Non-Explosive Actuator, 非火工品アクチュエータ) およびばねによる駆動機構)
- (2) アルミ合金/マグネシウム合金採用による軽量構造 (全体質量 約8.0 kg)
- (3) サンプル通過部に不純物混入防止のため純アルミコーティングを施工
- (4) ホーン部に高強度繊維および特殊パネを使用し、小惑星接地時の柔軟性を実現

サンプリング部はサンプルキャッチャ機構、サンプル分離機構、サンプル捕集チューブ退避機構、サンプル搬送機構およびラッチ・シール機構から構成され、またホーン部はホー



図5 サンプル採取機構(サンプリング部)外観写真
Photograph of sampler mechanism (Sampling part)



図6 サンプル採取機構(ホーン部)外観写真
Photograph of sampler mechanism (Horn part)

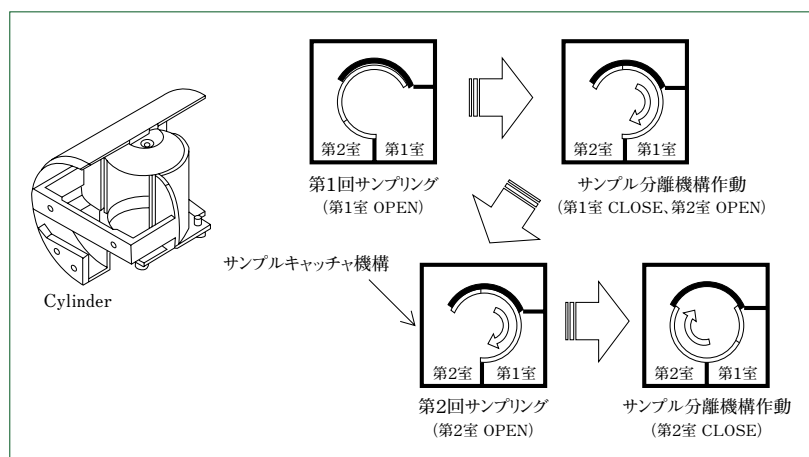


図7 サンプルキャッチャー及びサンプル分離動作概念図
Conceptual figure of catcher and sample separation mechanism

©JAXA

ン機構およびプロジェクト(当社範囲外)から構成される。各機構の詳細を次に示す。

2.2.1 サンプルキャッチャ機構

サンプルキャッチャ機構は、捕集したサンプルを格納する機能を有する。サンプルキャッチャ機構はキャッチャ本体、カバー、仕切板、サンプル漏洩防止板、回転筒およびコンタミネーションクーボンなどにより構成される。キャッチャ本体はアルミ合金製であり、カプセル内に設置される真空コンテナにできる限り多くのサンプルが格納可能なよう、下部の一部がフラットな円筒構造となっている。内容積は約70cm³である。キャッチャ本体内部は2回の捕集のサンプルが混合しないよう、仕切板により分離された2室に個別にサンプルを捕集できる構造となっている。図7に、サンプルキャッチャおよびサンプル分離動作概念図を示す。

2.2.2 サンプル分離機構

サンプル分離機構は、捕集したサンプルをサンプルキャッチャ機構内で2室に個別に捕集できる機能を有する。サンプル分離機構の主要部材はアルミ合金製であり、回転チューブ、回転部受台、NEA、回転用ねじりばねなどで構成される。図7に示す通り、2回のサンプリングにより捕集されるサンプルを個別に格納できるよう、回転分離動作が2回行える構造となっている。回転角度は計240°(120°×2回)である。回転チューブは下部に回転台が取り付けられ、その内部に装

着されたねじりばねにより回転駆動力が与えられ、上部に取り付けられたキャッチャ回転筒を回転させる。

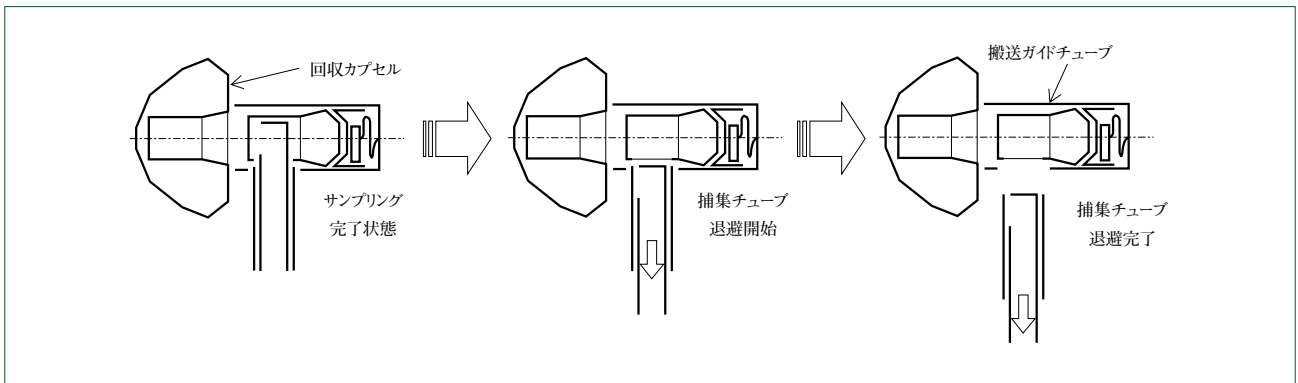
回転駆動力の保持/解放にはNEAが使用され、計2台搭載される。

2.2.3 サンプル捕集チューブ退避機構

サンプル捕集チューブ退避機構は、サンプル捕集後カプセルへの搬送動作が可能となるよう、サンプルキャッチャ機構から回転チューブなどサンプル分離機構一式を退避させる機能を有する。サンプル捕集チューブ退避機構の主要部材はアルミ合金製であり、固定チューブ、回転チューブシャッタ、NEA、退避用圧縮コイルばね、ガイドロッドなどで構成される。

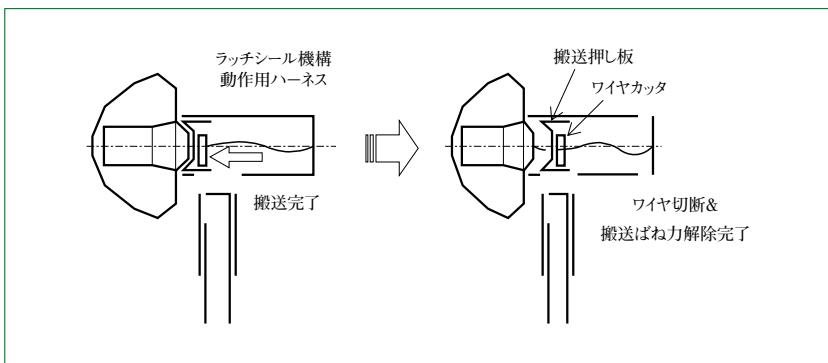
サンプリング時、サンプル分離機構一式は回転チューブがサンプルキャッチャ機構の所定位置にセットされるよう、NEAを介してサンプル本体に保持固定される。サンプリング終了後はNEAを作動させることにより、サンプル分離機構一式はガイドロッド外周に設置された圧縮コイルばねにてサンプルキャッチャ機構から離れ、下部に退避しガイドロッド下部のストッパに衝突し停止する。

回転チューブ外周には、チューブ出口からのサンプル漏洩防止のシャッタ機構が取り付けられる。本機構は上記の退避動作に伴い、圧縮コイルばねにより回転チューブ出口を閉塞する構造となっている。図8に、サンプル捕集チューブ退避



©JAXA

図8 サンプル捕集チューブ退避動作概念図
Conceptual figure of pull-out mechanism for sample collection tube



©JAXA

図9 サンプル搬送動作概念図
Conceptual figure of capsule insertion mechanism

動作概念図を示す。

2.2.4 サンプル搬送機構

サンプル搬送機構は、サンプリング後サンプルをサンプルキャッチャ機構とともに回収カプセル内に搬送し、かつ搬送後カプセル分離に影響をおよぼさないよう、搬送ばね力を解除できる機能を有する。サンプル搬送機構は構体取付フランジ、搬送ガイド、搬送押し板、NEA、圧縮コイルばね、ラッチ部保持機構、搬送ばね力解除機構などにより構成される。主要部材はアルミ合金製であるが、構体取付フランジなど一部の部品については、軽量化の目的によりマグネシウム合金が使用される。

サンプリング時、サンプルキャッチャ機構およびラッチ・シール機構は、搬送ガイドにヒンジ結合されたトリガおよびワイヤロープによりサンプリング位置に保持される。サンプリング後、NEAを作動させワイヤロープの拘束を解除することにより、これら機構一式は圧縮コイルばねによりカプセルまで搬送され、カプセル内コンテナシール面で停止する。

搬送ばね力解除機構は、カプセルへの搬送後、カプセルに残留する搬送ばねによる押付け力を解除する機能を有し、NEA、ワイヤロープおよびプッシュロッドにより構成される。カプセルへの搬送終了後NEAを作動させ、ワイヤロープの拘束を解除することにより、搬送押し板を搬送ガイドカバーとともに構体内部側方向に押し出し、カプセルへの押付け力を解除する。図9に、サンプル搬送動作概念図を示す。

2.2.5 ラッチ・シール機構

ラッチ・シール機構は、カプセルへのサンプルキャッチャ機構搬送後、キャッチャ機構を真空コンテナに固定し、かつ

カプセルが地上で回収されるまでの期間、真空コンテナ内を必要真空度に保持する機能を有する。

ラッチ・シール機構は、ラッチ内蓋、ラッチ外蓋、圧縮コイルばね、サンプルアプレータ、NEA、NEAケーブル切断用ワイヤカッター、Oリング、真空コンテナなどで構成され、主要部材はアルミ合金およびチタン合金が使用される。

ラッチ外蓋および内蓋は、サンプルキャッチャ機構を保持するとともに、カプセルの地球への再突入時において、真空コンテナの耐熱シールドとなる機能を有する。また、ラッチ外蓋背面にはサンプルアプレータが取り付けられ、再突入時のカプセル内部への熱流入が防止される。

ラッチ外蓋および内蓋は、NEAにより初期結合されており、さらに12個の圧縮コイルばねが外蓋と内蓋の間に設置される。カプセルへのサンプルキャッチャ機構搬送後、NEAに通電することにより両者間の拘束は解除され、外蓋および内蓋は圧縮コイルばねにより真空コンテナに押し付けられる。ラッチ動作終了後は、カプセルが衛星より分離可能となるよう、NEAから構体内部へのケーブルは搬送押し板に取り付けられたワイヤカッターにより切断される。

ラッチ機構と真空コンテナのシールは同心円状2重に配置されたOリングゴムにより行われる。Oリング間は、コンテナへの空気透過量を低減させるようポケット部が設置されており、地上での回収までの期間において所定の真空レベルが確保される。図10に、ラッチ・シール動作概念図を示す。

2.2.6 ホーン機構

ホーン機構は、プロジェクタにより小惑星表層から破碎されたサンプルをキャッチャ部へ導き、かつ小惑星タッチダウ

表3 サンプル採取機構の動作履歴
A logging sample of sampler mechanism sequence in space

動作	動作年月	結果
①ホーン伸展	2003年5月9日(打上げ直後)	正常に動作(リミットスイッチ信号をテレメトリにて確認)
②サンプル分離	2005年11月26日(小惑星タッチダウン直後)	正常に動作(リミットスイッチ信号をテレメトリにて確認)
③サンプル捕集チューブ退避	2007年1月18日	正常に動作(リミットスイッチ信号をテレメトリにて確認)
④サンプル搬送	2007年1月18日	正常に動作(リミットスイッチ信号およびカプセル温度変化をテレメトリにて確認)
⑤ラッチ・シール	2007年1月18日 2010年6月(地球帰還後)	正常に動作(カプセル温度変化をテレメトリにて確認 また地球帰還後の状態にて確認)
⑥搬送ばね力解除	2007年1月18日	正常に動作(リミットスイッチ信号をテレメトリにて確認)

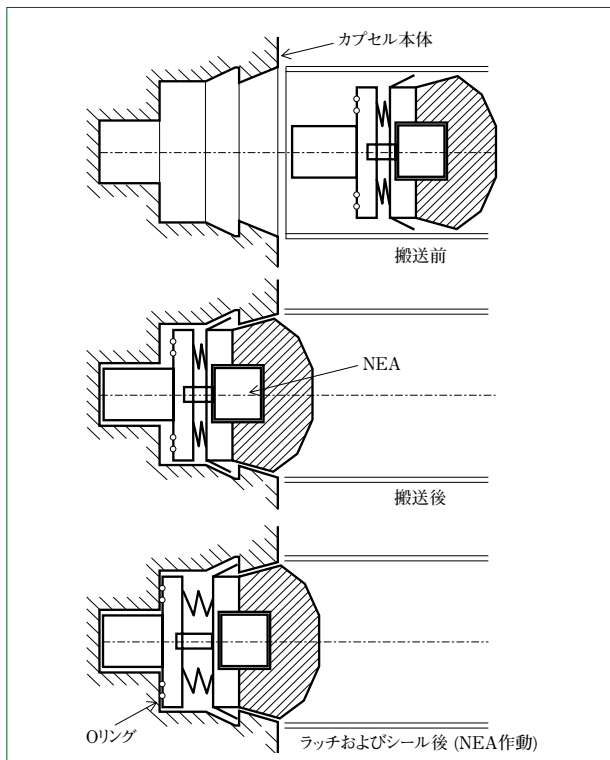


図10 ラッチ・シール動作概念図
Conceptual figure of latch and seal mechanism

©JAXA

ン時、縦横方向に柔軟に変形できる機能を有する。

ホーン機構は、打上げ時のロケット内設置領域の制約から、打上げ時には衛星下部パネルから全長400 mmに収納され、打上げ後は宇宙空間にて全長1000 mmまで伸展する構造とした。ホーン伸展には伸展ストロークを考慮しDHS(Double-reverse Helical Spring)が使用され、同時にタッチダウン時の柔軟変形もDHSの伸縮および曲げにより行われる。

ホーン機構は構体下部パネル外面に設置され、固定ホーン、伸展ホーン、布ホーン、固定式ダストガード、展開式ダストガード、保持解放機構、ホーン伸展機構(DHS)、プロジェクタなどで構成される。主要部材はアルミ合金およびマグネシウム合金が使用される。布ホーン部は耐貫通強度確保のほか、タッチダウン時に外力の加わった場合の伸縮性も確保するべく高強度繊維が使用される。図11に、ホーン伸展動作概念図を示す。

3 軌道上での作動実績

表3に、打上げ後のサンプル採取装置の作動実績を示す。いずれの動作もすべて正常に行われたことが確認され、サ

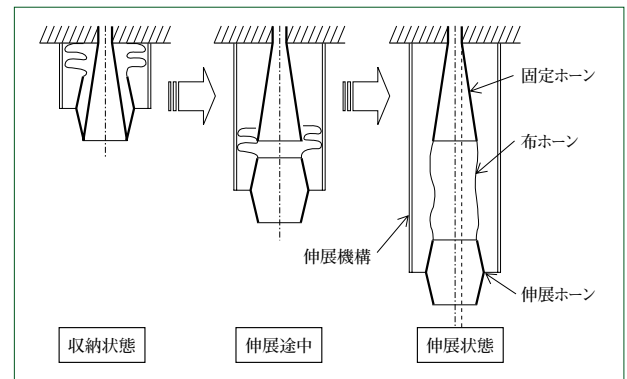


図11 ホーン伸展動作概念図
Conceptual figure of horn extension mechanism

©JAXA

ンプル採取機構としては100%の成功を収めた。また、地球帰還後に回収されたサンプルキャッチャから採取された約1500個の微粒子については、2010年11月16日にイトカワ起源のものと正式に発表され、はやぶさは与えられたミッションを完遂した。これら微粒子の分析により、今後惑星形成と進化の解明が期待されている。

4 むすび

- (1) 小惑星探査機はやぶさに搭載されたサンプル採取機構の開発を行った。
- (2) サンプル採取機構は、軌道上で所定の動作を正常に行い、小惑星から微粒子を採取しカプセルに格納したことが確認された。
- (3) 本機構の高い動作信頼性が実証されたことにより、今後同種の小惑星探査ミッションへの適用が期待されている。

参考文献

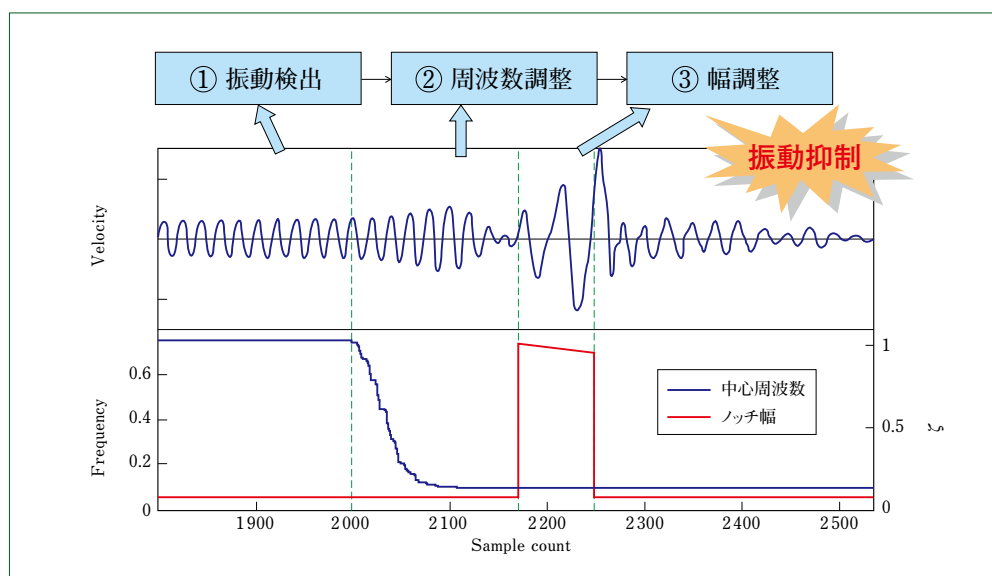
- (1) 藤原他. 無重力環境下での試料採取の技術の開発. 宇宙環境利用に関する公募地上研究. 平成10年度 研究成果報告書.
- (2) 藤原顕, 矢野創. 「はやぶさ」に搭載された小惑星試料採取機構. 日本航空宇宙学会誌, 53(620), 2005, P264-271.

適応ノッチフィルタの開発およびXYステージへの適用

Development of Adaptive Notch Filters and Its Application for XY Stage

● 小木 曾 太 郎*
Taro OGISO

塚 原 真 一 郎*
Shinichiro TSUKAHARA



適応ノッチフィルタの動作
A reaction of adaptive notch filters

高い運動性能が求められる装置では、高ゲインのフィードバック制御が必要になることが多い。装置の共振特性が高ゲイン化を阻害する場合には、ノッチフィルタを用いて安定化が図られる。ノッチフィルタは制御ループの安定化に高い効果が得られるものの、適切に調整しないと効果が低下するばかりか、不安定化を招く場合もある。たがいに周波数の近い共振が存在するときはノッチフィルタと共振の位相干渉が強くなるので、調整には高い専門技能が必要になる。本稿では、ノッチフィルタ調整の容易化を目指して開発した適応ノッチフィルタに関して報告する。プラントからの観測量にもとづいて中心周波数とノッチ幅を自動調整する手法により、適応ノッチフィルタを開発した。XYステージのサーボ調整に適用し、3段のノッチフィルタが適切に自動調整されることを確認した。

Devices that need higher kinematical performance frequently require high gain feedback control. When achievement of high gain feedback control is precluded by the resonance characteristics of the devices, notch filters are used to stabilize the control system. Although notch filters effectively stabilize the control loop, improper tuning may lead to decreased stabilization effect and unstable system behavior. When many resonant modes appear closely in the frequency domain, serious phase interference will occur between notch filter and resonance frequencies. For this reason, sophisticated expertise is required to tune the notch filters. We have developed adaptive notch filters aiming at facilitating tuning. This article reports the newly developed adaptive notch filters resulting from the new method by which the center frequency and notch width are automatically tuned based on the measurements collected from plants. We used adaptive notch filters to tune the servo system of the XY stage and confirmed that three-stage notch filters were automatically tuned in a proper manner.

1 まえがき

半導体の製造や検査、金型加工などに使われる高性能な位置決め装置において制御仕様を満たすには、低周波での外乱抑制と高周波での共振安定化を考慮してコントローラを高ゲインにチューニングする必要がある。高周波の共振特性は高精度なモデル化が困難なことから、技術者によるサーボ調整

に依存していることが多い。サーボ調整は出荷時のみならず、機械特性の経年変化への対応や、用途変更などの場合にも実施する。高ゲインのサーボ調整には長い時間がかかり、作業費用が高くなる。このため、サーボ調整の簡易化は産業上重要な技術となっている。

高性能な位置決め装置は十分な制御性能を得るために、共振周波数が所要の周波数以上となるように機構を設計する。

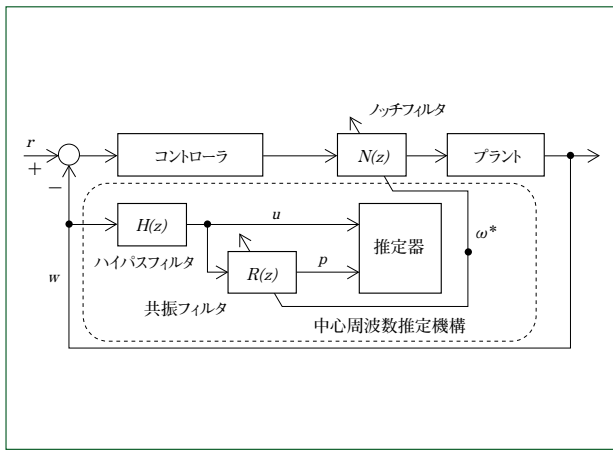


図1 適応ノッチフィルタの構成
Block diagram of adaptive notch filters

装置は、この周波数以下の領域において剛体モードで動作する。また、外乱の抑制には静圧案内などが採用されることが多く、共振の減衰性が低い傾向にある。そこで制御ループにノッチフィルタを挿入し、ループゲインを局所的に抑制することで低周波領域の高ゲイン化を実現することが多い。ノッチフィルタは開ループの位相を変化させる。調整が不適切な場合にはゲイン抑制の効果がなければ、位相の不安定化を引き起こすことがある。ループ中で複数使うときには、プラントの位相特性と複数のノッチフィルタの位相特性を考慮した複雑な調整を行う。このような調整には高い専門技能が必要であることから、調整の自動化が求められている。

本報ではノッチフィルタの中心周波数とノッチ幅の調整を自動化した適応ノッチフィルタの開発と、XYステージのサーボ調整への適用について報告する。中心周波数の調整アルゴリズムは信号処理分野で研究されたオールパス型適応ノッチフィルタ⁽¹⁾の原理にもとづいており、多軸コントローラにおいて複数のノッチフィルタを使う多自由度の位置決め装置の場合、演算時間低減の面から有利である。また、中心周波数を逐次更新し、閉ループ制御中でもプラントの共振周波数を高精度に推定することができる。ノッチ幅の調整アルゴリズムは位相余裕の確保を重視しており、本事例のXYステージのように近接する帯域で異なる共振モードを抑制する場合に有利である。

2 適応ノッチフィルタ

2.1 機能

適応ノッチフィルタは①振動検出、②周波数調整、③幅調整の各機能を備えている。代表図にXYステージにおいて適応ノッチフィルタが動作したときの速度、中心周波数の推定値 ω^* およびノッチ幅のパラメータ ζ_N の時間変化を示す。周波数はナイキスト周波数によって正規化した値、時間はサンプル数でそれぞれ表示している(6章の実験結果についても同様)。振動検出機能は共振の励起を判定すると、中心周波数の調整を開始する。周波数調整は ω^* の収束が判定されると終了し、続いてノッチ幅の調整を開始する。一連のシーケンスを自動化したことで、ノッチフィルタの調整を効率よく行うことができる。

2.2 周波数調整

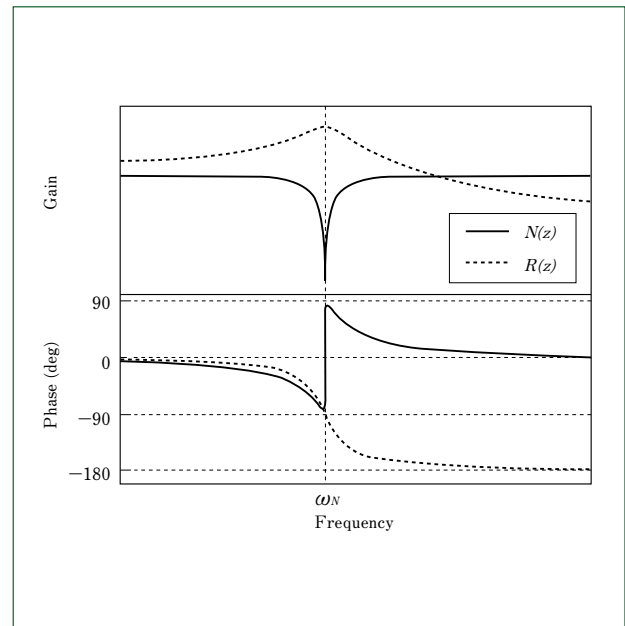


図2 ノッチフィルタと共振フィルタの周波数特性
Frequency characteristics of notch filters and resonance filters

開発した適応ノッチフィルタをフィードバック制御系に適用すると図1のようになる。 $N(z)$ は推力指令などをフィルタリングするノッチフィルタである。 $N(z)$ の伝達関数を連続時間で示すと式(1)のようになる。

$$\frac{s^2 + 2\zeta_N \omega_N s + \omega_N^2}{s^2 + 2\zeta_N \omega_N s + \omega_N^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで ω_N は中心周波数、 ζ_N は ω_N におけるゲインである。 $N(z)$ のボード線図を図2に実線で示す。 ω_N においてゲインが抑制されることと、 ω_N の前後で位相の遅れ進みのあることがわかる。 $H(z)$ はプラントの観測量 w から調整に不要な指令応答成分などを除去した信号 u を出力するハイパスフィルタである。 $R(z)$ は共振周波数 ω_N の共振フィルタで、 u をフィルタリングして信号 p を出力する。 $R(z)$ のボード線図を図2に点線で示す。 ω_N にゲインピークがあることと、 ω_N において位相が90deg遅れることがわかる。推定器は u の振動周波数 ω^* を推定する。

ここで u が振幅 a 、周波数 ω の正弦波であると仮定して ω^* の推定原理を説明する。添え字 k をサンプル数、 T_s をサンプリング時間とすれば定常状態において、

$$u_k = a \sin k \omega T_s \dots\dots\dots (2)$$

$$p_k = a |R(j\omega)| \sin(k\omega T_s + \arg R(j\omega)) \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $|R(j\omega)|, \arg R(j\omega)$ は周波数 ω における $R(z)$ のゲインと位相である。式(2)、(3)から

$$\begin{aligned} u_k p_k &= a^2 |R(j\omega)| \sin k \omega T_s \sin(k\omega T_s + \arg R(j\omega)) \dots\dots\dots (4) \\ &= \frac{1}{2} a^2 |R(j\omega)| \{ \cos(\arg R(j\omega)) - \cos(2k\omega T_s + \arg R(j\omega)) \} \end{aligned}$$

となるから十分長い区間で積 up の平均 $E[up]$ を計算すれば、

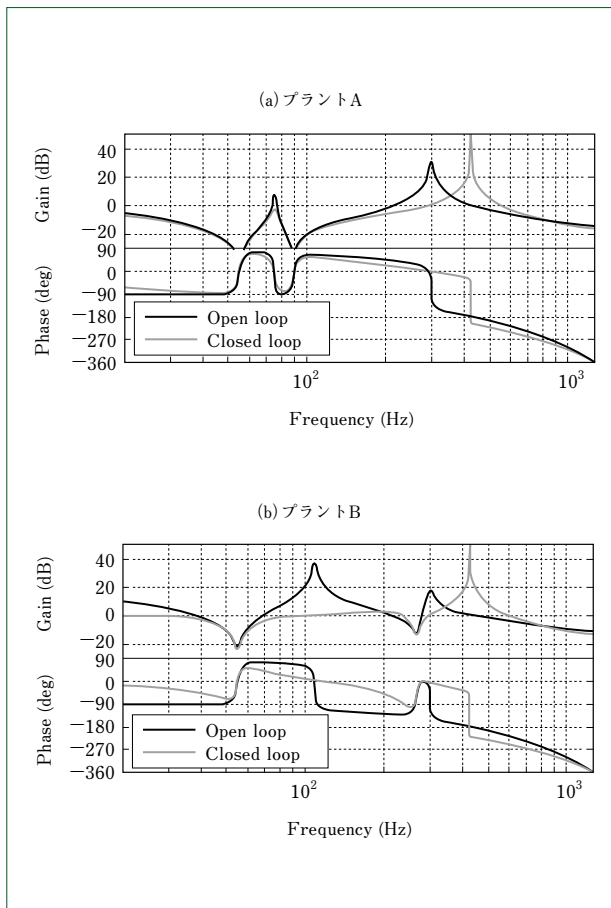


図3 動作確認用プラントの周波数特性
Frequency characteristics of plants for the simulation

$$E[up] = \frac{1}{2} a^2 |R(j\omega)| \cos(\arg R(j\omega)) \dots (5)$$

となる。 $R(z)$ の位相特性より、 $E[up]$ は

$$E[up] = \begin{cases} >0 & \text{if } \omega < \omega_N \\ =0 & \text{if } \omega = \omega_N \\ <0 & \text{if } \omega > \omega_N \end{cases} \dots (6)$$

となるから、 λ を正の実数として、式(7)のような漸化式を利用して $R(z)$ の共振周波数を更新すれば、 ω_N を ω に収束させることができる。

$$\omega_{Nk+1} = \omega_{Nk} - \lambda u_k p_k \dots (7)$$

実際には式(8)-(10)のアルゴリズム⁽²⁾を用いて ω^* を ω に収束させる。

$$\Delta \omega_k^* = \lambda u_k p_k / \Phi_k \omega_k^* \dots (8)$$

$$\omega_{k+1}^* = \omega_k^* - \Delta \omega_k^* \dots (9)$$

$$\Phi_k = (1-r) \Phi_{k-1} + r p_k^2 \dots (10)$$

更新量 $\Delta \omega^*$ の計算において積 up を Φ で除す理由は、 $\Delta \omega^*$ から振幅 a の影響を簡便に低減するためである。さらに $\Delta \omega^*$ の分母には $|R(j\omega)|$ が含まれる。 $|R(j\omega)|$ は ω と ω_N の差が小さいほど大きな値をとるので、 ω^* は ω へゆるやかに収束すると考えられる。

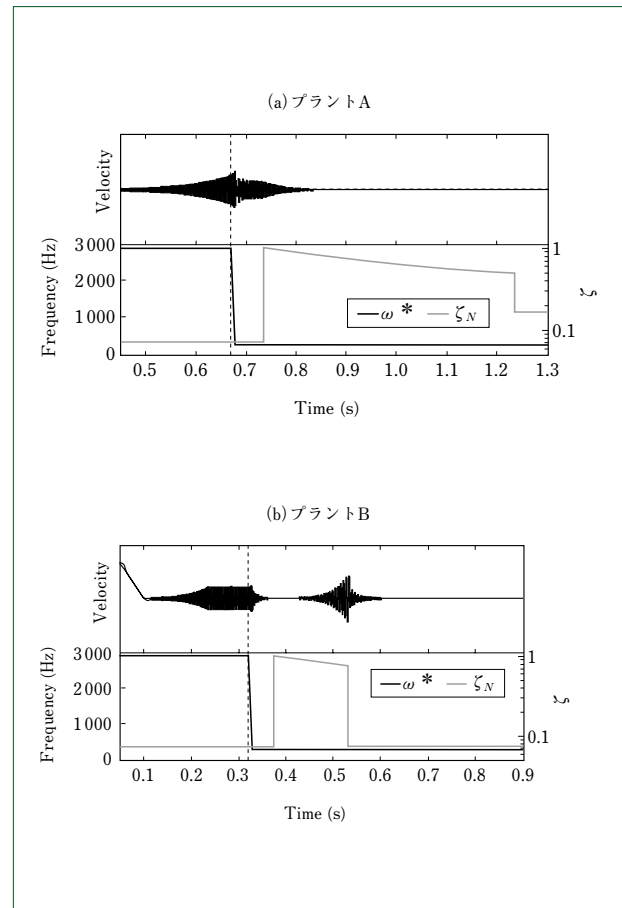


図4 シミュレーションによる動作確認結果
Simulation results

周波数調整は共振が励起状態にあるような、単一周波数振動が大きく現れているときに行う。 $\omega_N = \omega^*$ として $N(z)$ の係数を更新すれば、中心周波数をプラントの共振周波数に一致させることができる。演算量を低減するべく、一定サンプルごと $N(z)$ および $R(z)$ の係数を更新することも可能である。

2.3 幅調整

ノッチ幅は ζ_N に比例する。幅調整では ζ_N をある区間でスワイプしながら一定サンプル毎に $N(z)$ の係数を更新する。このとき、ある基準を上回る振動を検出した場合はスワイプを中止し、 ζ_N を低水準な ζ_{NL} に設定してノッチ幅を狭くする。基準を上回る振動を検出することなくスワイプが完了したときは ζ_N を高水準な ζ_{NH} に設定してノッチ幅を広くする。スワイプ区間は周波数調整中および ζ_{NH} よりもさらにノッチ幅が広がるように設定する。このことから、スワイプが完了した場合はスワイプ区間と ζ_{NH} との差に応じた位相余裕を確保することができる。

3 シミュレーションによる動作確認

3.1 動作確認用プラント

図1においてプラントを位相遅れのある3慣性系とした速度制御のシミュレーションを行い、適応ノッチフィルタの動作を確認した。3慣性系は3つの慣性体をねじりばね要素で結合した回転系のモデルとし、第1慣性の角速度 ω をフィードバックして第1慣性へのトルク指令を演算した。プラントは位相交叉周波数(420 Hz)、1次反共振周波数(55 Hz)、2次

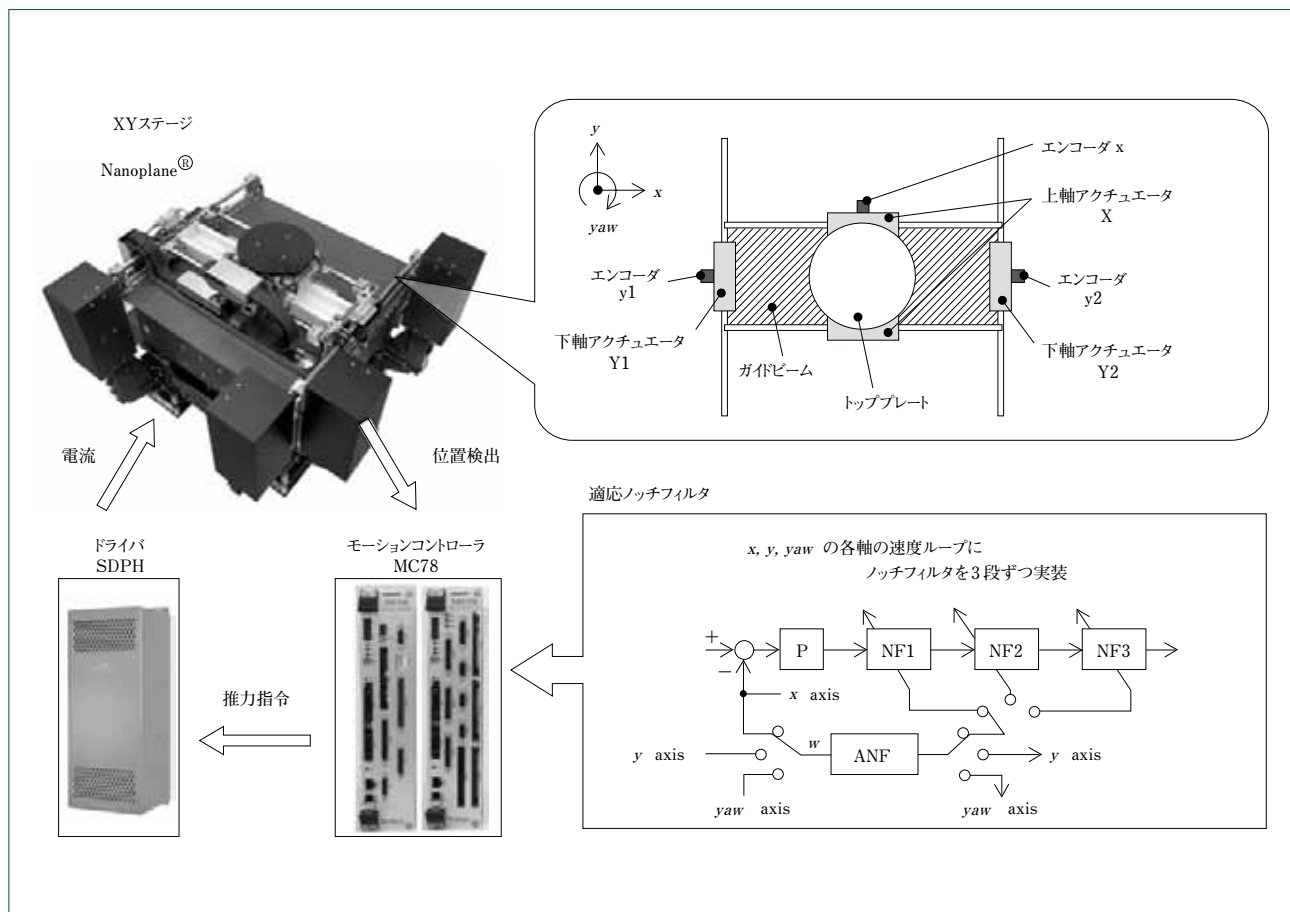


図5 XYステージの制御システム
Schematics of control system for XYstage

共振周波数(300 Hz)が等しいA, Bの2種類を設定した。制御系が安定限界となるようにループゲインを調整したときの開ループと閉ループの周波数特性を図3に示す。プラントAおよびBは、位相交叉周波数において閉ループの共振が生じている。しかしながら $\omega_N=420$ Hzとしてしまうとノッチフィルタの位相特性によって2次共振が不安定化される。逆に $\omega_N=300$ Hzとすれば、ノッチフィルタの位相特性によって位相交叉周波数を高周波に遷移させることができる。また、プラントAは2次反共振周波数と2次共振周波数の比が大きいため、ノッチ幅を広めにとるほうが安定性を高められる。一方、プラントBは2次反共振周波数と2次共振周波数の比が小さいことから、ノッチ幅を狭めにしないと110~200 Hzで位相不安定になるおそれがある。

3.2 動作検証の結果

速度制御中に比例ゲインをランプ状に上げることで共振モードを励起し、適応ノッチフィルタを動作させた。図4はシミュレーションの結果であり、それぞれ上図が速度、下図が ω_N と ζ_N の時間変化である。垂点線は周波数調整の開始時期を示す。図4(a)はプラントAに対する結果である。周波数調整においては2次共振周波数を高精度に推定し $\omega_N=295$ Hzとなった。幅調整においてはスイープ中に基準を上回る振動が検出されことなく $\zeta_N=\zeta_{NH}$ を選択した。図4(b)はプラントBに対する結果である。周波数調整においては2次共振周波数を高精度に推定し $\omega_N=287$ Hzとなった。幅調整においてはスイープ中、110~200 Hzにおいて位相不安定となり、基

準を上回る振動が検出されたことで $\zeta_N=\zeta_{NL}$ を選択した。

以上の結果から、周波数調整は閉ループ制御中でもプラントの共振周波数を高精度に推定することができ、幅調整は位相余裕の確保を重視するという、設計意図通りの動作を確認することができた。

4 XYステージへの適用

当社の露光・高精度検査装置用XYステージNanoplane®(図5)のサーボ調整に適応ノッチフィルタを適用した。XYステージはガイドビームを駆動する下軸と、トッププレートを駆動する上軸が、リニアモータによって互いに直交の並進駆動を行うことでXY平面内の位置決めをする。制御系はx軸(上軸並進)、y軸(下軸並進)、yaw軸(下軸回転)の3制御自由度を有する。

複数軸を同時に制御するXYステージ制御システムにノッチフィルタの調整機能を1個実装した。ノッチフィルタはx, y, yawの各軸の速度ループに3段階ずつ実装した。速度ループは同図中に示したような構成とした。ここでPは比例制御器、NF*i* (*i*=1,2,3)はノッチフィルタ、ANFは中心周波数推定機構を表す。Nanoplane®は外乱オブザーバ⁽³⁾を備える。外乱オブザーバには定常特性の補償効果もあり、積分制御は使わなかった。サーボ調整時には指定された軸の速度を信号*w*として待機する。ループゲインを上げるなどして共振モードが励起されると、ノッチフィルタを1段階ずつループ中に挿入して自動調整を開始する。複数のノッチフィルタを同時に自動調

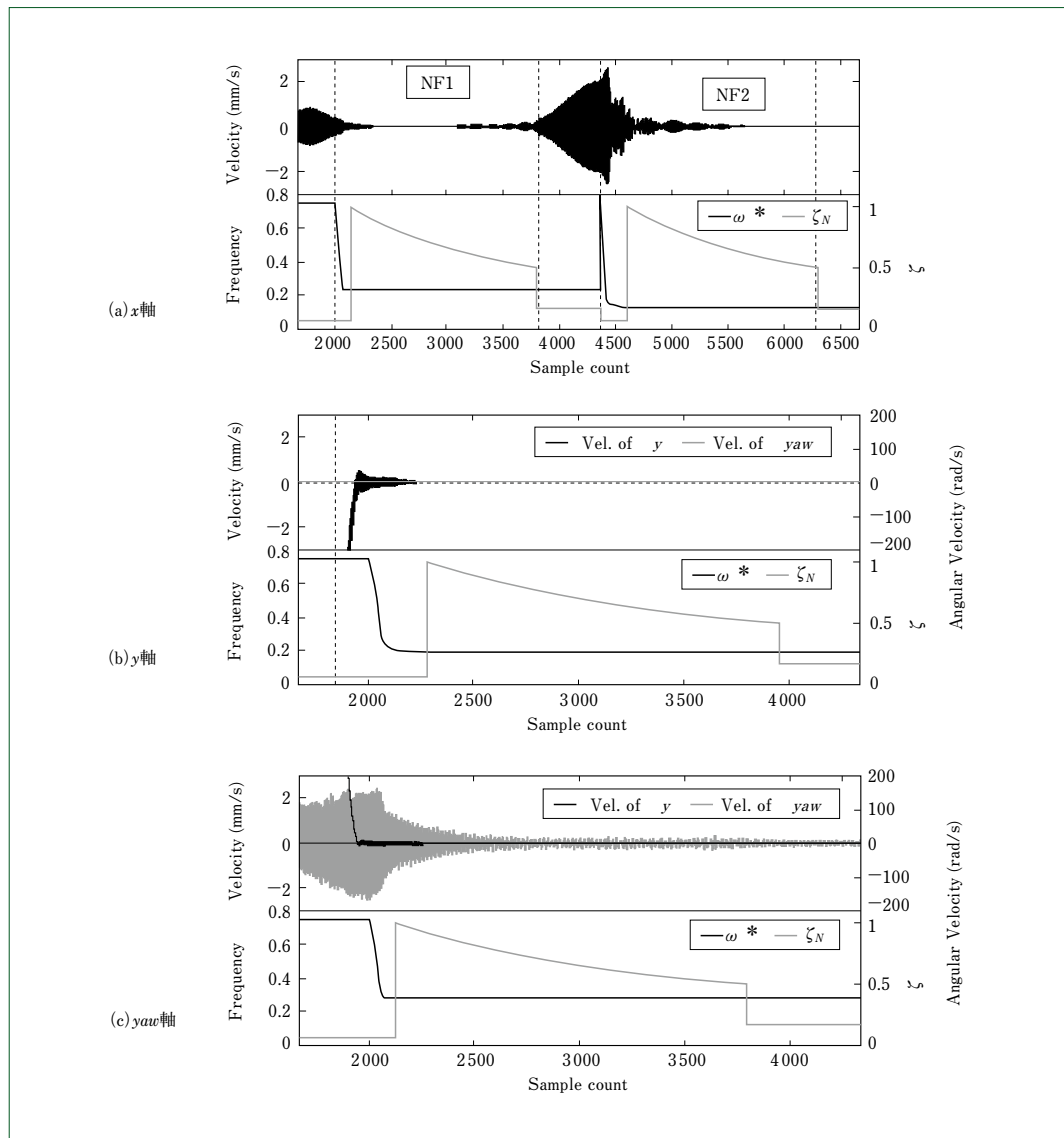


図6 適応ノッチフィルタの動作例
Experimental results of adaptive notch filters

整することはない。

5 サーボ調整の手順

まず、制御系が安定になるよう十分低いサーボゲインを初期値として与える。ノッチフィルタを使わない状態から、下記手順でサーボ調整を行った。

- (1) 速度ループ帯域を1%ずつ上げる。
- (2) 動作指令を与える。
- (3) 手順1, 2で振動レベルが高くなった場合は、適応ノッチフィルタがループ中にノッチフィルタを挿入し、中心周波数と幅を自動調整する。
- (4) ノッチフィルタを3段使い切った状態で振動レベルが高くなると、あるいは適応ノッチフィルタが動作しても振動を抑えられなかったときの速度ループの帯域を限界値とする。
- (5) 速度ループ帯域を限界値の70~80%程度に設定する。
- (6) 位置ループ帯域を速度ループ帯域の25%程度に設定する⁽⁴⁾。
- (7) 停止時の位置偏差を確認しながら、位置ループ帯域と

外乱オブザーバのカットオフ周波数を同じ値として調整する。

外乱オブザーバを使わず、速度ループで積分制御を行う場合は手順(7)の外乱オブザーバのカットオフ周波数を積分時定数の逆数と読みかえればよい。この手順のメリットは調整者が応答波形を見ながら調整するパラメータが位置ループ帯域のみであり、制御技術者以外の人でも実施が容易なことである。

6 実験結果

5章の手順(ただし手順(7)は省略)にもとづいてXYステージのサーボ調整を行った。 x 軸と y 軸には3段、 yaw 軸には1段のノッチフィルタがそれぞれ挿入された。適応ノッチフィルタが動作したときの速度応答と ω_N および ζ_N の時間変化を図6に示す。図6(a)は x 軸のNF1とNF2の調整の様子である。最初の共振励起に伴ってNF1を調整した際に、NF1の位相遅れによってさらに低域の共振を励起させたものの、直後にNF2の調整を行うことで制御系を安定化した。図6(b)は y 軸のNF2の調整の様子である。図6(c)は yaw 軸のNF

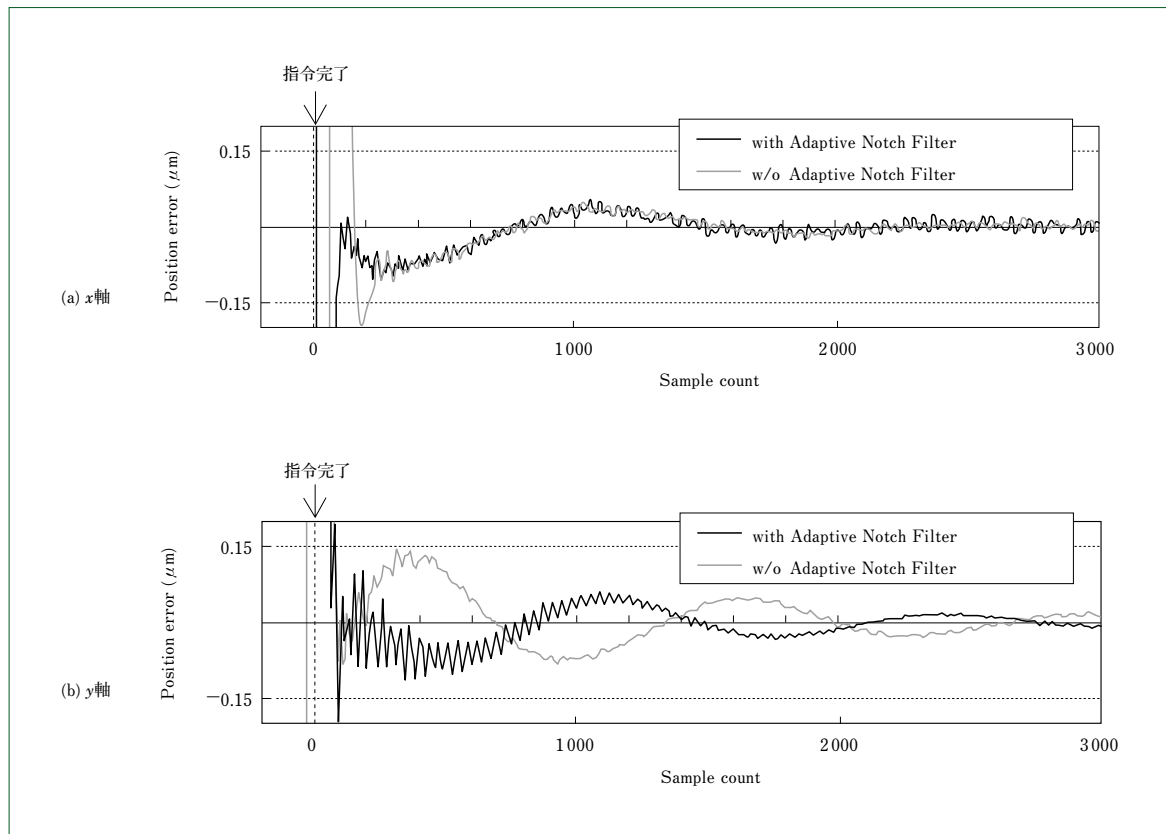


図7 位置決め整定の結果比較
Comparison of position settling behaviors

1の調整結果である。いずれの結果でも励起された共振が適応ノッチフィルタの動作によって抑制されたことが分かる。

ノッチフィルタを手動で調整した場合と、適応ノッチフィルタを使った場合とで $0.15\mu\text{m}$ 以内への位置決め整定性を比較した。図7(a)はx軸を最大速度から最大加速度で減速停止した際の位置偏差を示したものである。適応ノッチフィルタを使った場合の方が130サンプルほど速く整定した。図7(b)はy軸を最大速度から最大加速度で減速停止した際の位置偏差を示したものである。適応ノッチフィルタを使った場合は高周波の残留振動が目立つため、18サンプルほど遅く整定した。これは、ノッチフィルタを手動で調整した場合よりも位置ループの帯域が高くなったためで、5章の手順(7)を省略せずに位置ループの帯域を調整すれば、両者の挙動は一致したと考えられる。

以上の結果から、XYステージにおいて適応ノッチフィルタが有効に動作することを確認した。

7 むすび

- (1) プラントからの観測量にもとづいて中心周波数とノッチ幅を調整する適応ノッチフィルタを開発した。特長を次にまとめる。
 - ・多軸制御や多段ノッチフィルタのような、複数のノッチフィルタの調整に対応している。
 - ・ループ制御中にプラントの共振周波数を高精度に推定する。
 - ・位相余裕の確保を重視したノッチ幅の調整をする。

- (2) 当社XYステージにおいて開発した適応ノッチフィルタの動作を確認した。

(参考文献)

- (1) James Okello, 仲尾昌樹, 伊藤良生, 副井裕, 小林正樹. オールパス型適応ノッチフィルタの収束速度に関する一検討. 電子情報通信学会技術研究報告, 2000, p.111~116.
- (2) 木坂正志. 周波数追従型ピークフィルタを使った適応ノッチフィルタ. 電気学会研究会資料, 産業計測制御研究会, IIC-06-136, 2006.
- (3) 牧野健一, 杉峰正信, 富田良幸. 高精度レーザ加工システム用XYステージの開発. 精密工学会誌, Vol.67, no.1, 2001, p.65-69.
- (4) 吉浦泰史. ACサーボモータの制振制御技術. 第30回モータ技術シンポジウム, B6最近の制振制御-2, 2010.

陽子線治療装置用スキャニング制御システムの開発

Development of Scanning Control System for Proton Therapy System

●井 上 淳 一*
Junichi INOUE



陽子線治療装置
Proton Therapy System

陽子線治療装置は、線量集中性の高い放射線がん治療法として普及してきた。さらに陽子線のペンシルビームスキャン照射法は、先進的な治療法として開発が進められてきた。当社は、この照射法の開発を独立行政法人国立がん研究センターと共同で進めている。

スキャニング制御装置は、治療計画に従い正確にペンシルビームを患部へ照射すること、また照射中のペンシルビームの位置を高精度でモニタすることが求められる。さらにペンシルビームの走査中はビームの強度を一定に保つ必要があり、ビーム強度安定化システムを組み込む必要がある。当社では本課題に取り組み、ビームの位置を $20\mu\text{s}$ 以内の高速かつ位置分解能 0.1mm 以下で測定できるモニタシステムを開発した。またビームの安定化制御システムにより、ビーム強度の安定度を $\pm 1\%$ 以内に収めることを達成した。この治療方法は、2011年後半からの治療開始に向けて準備が進められている。

Proton Therapy is a kind of radiation therapy which can concentrate dose distribution in the tumor, and is widely used today. Pencil beam scanning method has been developed as an advanced approach to proton therapy. We have developed this method in collaboration with National Cancer Center Hospital East (NCCE). The scanning control system is required to scan beam spot in precise position and detect it with high accuracy. In addition, it is necessary to design a beam current stabilize control system which can secure stable dose distribution. We have developed an advanced scanning control system which has a monitoring system to detect beam position with resolution of less than 0.1mm and fast sampling time (less than $20\mu\text{s}$), and a beam current controller to stabilize beam current within $\pm 1\%$. The pencil beam scanning treatment is scheduled to start within 2011.

1 まえがき

1.1 陽子線治療装置の特長

陽子線とは、水素の原子核を加速した放射線の一種であり、陽子線治療装置は、陽子線をがん患部に照射してがん細胞を死滅させる装置である。陽子線は体内に入っても表面近くではエネルギーを放出せず、停止する直前にエネルギーを放出して大きな線量を組織に与える性質を持つ。これは、病巣の

みに効率よく線量を集中させることが可能であることから、治療による副作用を抑えることができ、がん患者のQOL (Quality of Life) を高める治療法として近年各国で導入が図られている。

当社では、1998年に独立行政法人国立がん研究センターに1号機を導入し、2001年から高度先進医療としてがん治療に用いられている。現在、より高い治療効果を求めて、新規技術の導入が行われている。ペンシルビームスキャニング照射

表1 ビーム安定化要求仕様
Major specifications of beam current stabilization

電流範囲	0～30 nA
ビーム強度安定度	±1.0%以内
持続時間	10s以上

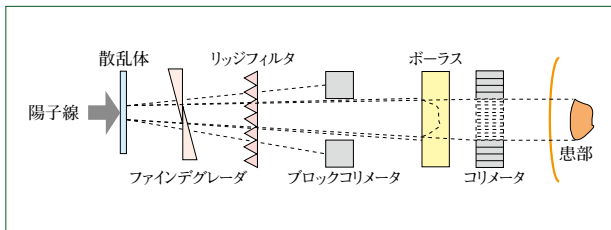


図1 ブロードビーム法(従来法)
Broad beam irradiation (conventional method)

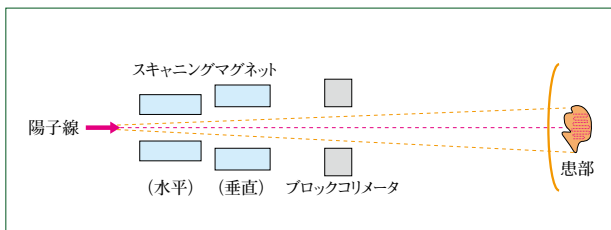


図2 ペンシルビームスキャン照射法
Pencil beam scanning irradiation

法(Pencil Beam Scanning)を用いた手法は、がん患部への正確な照射が可能な方法として近年開発が行われてきた。

当社は、独立行政法人国立がん研究センターと共同で、2007年よりペンシルビームスキャン照射法の開発を行ってきた。

1.2 ペンシルビームスキャン照射法導入の背景と特長

陽子線治療ではこれまで、ブロードビーム法と呼ばれる照射方法が一般的であった。これは患部の形状にビームを整形するべく、まず散乱体を用いてビームを広げ、そのあと患部形状に合わせたボラスやコリメータといわれるハードウェアを使って整形し照射する方法である(図1)。しかしこの方法ではハードウェア、ボラスやコリメータを患者ごとに製作する手間が必要であった。

それに対してペンシルビームスキャン照射法は、ビームをスポット状に絞ったペンシルビームを走査させ患部の輪郭に合わせ照射する方法で、患部の外への不必要な照射がなく、さらにがん患部中心に集中的に照射量を多くしたり、患部内部の照射線量分布を変化させたりすることが容易にできる特長を持つ(図2)。またペンシルビームスキャン照射法ではボラスやコリメータは必要としないため、診断から治療までの期間が短縮でき、病院として受け入れ患者数の増加が期待できる。

2 システム概要

ペンシルビームスキャン照射法は、サイクロトロンにより加速され、治療室に移送された陽子線をノズルと呼ばれる機器により走査させることで実現する。陽子線がノズルを通過すると、ノズル内にあるスキャンング電磁石でビーム方向が変化する。走査範囲を患部の形状に合わせることで高精度な照射を実現する。図3に、スキャンング

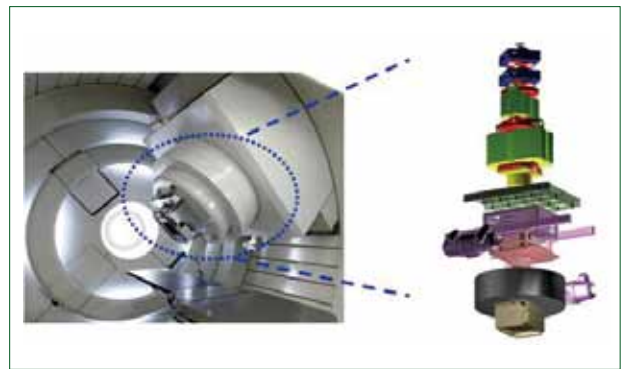


図3 スキャンングノズル
Scanning nozzle

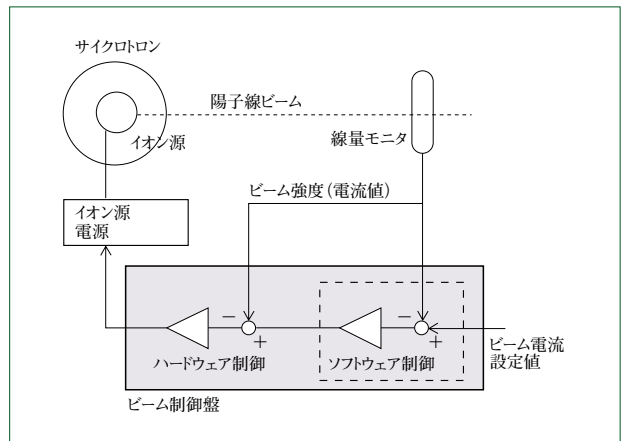


図4 ビーム強度安定化システム概要
System diagram of beam current stabilization

用のノズルを示す。

ペンシルビームスキャン照射法の導入に当たり、必須となる技術項目を次に示す。

2.1 ビーム強度の安定化制御

照射は治療計画に従って行われる。治療計画は照射線量分布を規定する。実際の照射では一定強度のビームを走査する。線量分布は走査速度を変調させ照射時間をコントロールすることで、任意の照射線量分布を作る。したがってビーム強度の安定化は、治療計画にもとづいた照射線量分布の正確な実現に必要である。表1に、ビーム安定化に関する要求仕様を示す。

ビーム強度の安定化は、イオン源のパラメータの変動および高周波加速電圧の変動などを低減させると同時に、ビーム強度をフィードバックし、安定に制御する手法を採用して実現した。図4に、ビーム強度の安定化制御に関するシステム概要を示す。

2.2 ビーム位置の高精度測定

ペンシルビームを走査させる際、何らかの原因でペンシルビームが計画位置から逸れる場合が考えられる。ビームが逸れると正常細胞にペンシルビームが当たり、正常組織に悪影響を与えたり、線量分布が計画値とは異なり治療効果に悪影響を及ぼすリスクがある。リスク低減には、ペンシルビームの位置をリアルタイムでモニタし、ビームが計画位置から逸れた場合、短時間でそれを検知しビームを停止させる必要がある。

ビーム位置モニタは照射ノズルの終端部に位置し、患者に

表2 ビーム位置モニタ仕様
Major specifications of beam position monitor

位置精度	1.0 mm以下
測定分解能	0.1 mm以下
サンプリング時間	12.5 μ s
測定範囲	300 mm $\times$ 400 mm

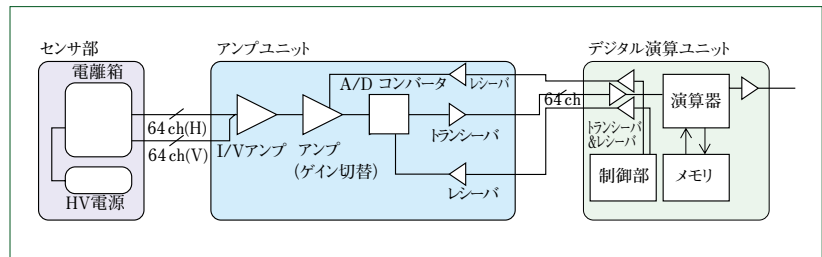


図6 ビーム位置モニタシステム構成
System diagram of beam position monitor



図5 ビーム位置モニタユニット
Beam position monitor unit

陽子線を当てる直前のビームスポットの位置を検知する。ビーム位置モニタのサンプリング時間は、走査ビームが逸れても影響のない間隔で行う必要がある。また測定精度も十分良いものが求められる。表2に、ビーム位置モニタの要求仕様を示す。

図5に、ビーム位置モニタユニットの外観を、図6に、ビーム位置モニタのシステム構成を示す。

ビーム位置モニタは、センサ部、アンプユニットおよびデジタル演算ユニットで構成する。

(1) センサ部

電離箱に内蔵した透過型マルチストリップワイヤにより、電荷の収集を行う。ワイヤはX軸方向、Y軸方向においてグリッド構造になっており、ビーム分布の検出を行う。

(2) アンプユニット

位置センサ部において収集した電荷信号を、アンプ回路により増幅する。その後、A/Dコンバータにより信号をデジタル化したあと、演算処理回路に送信する。

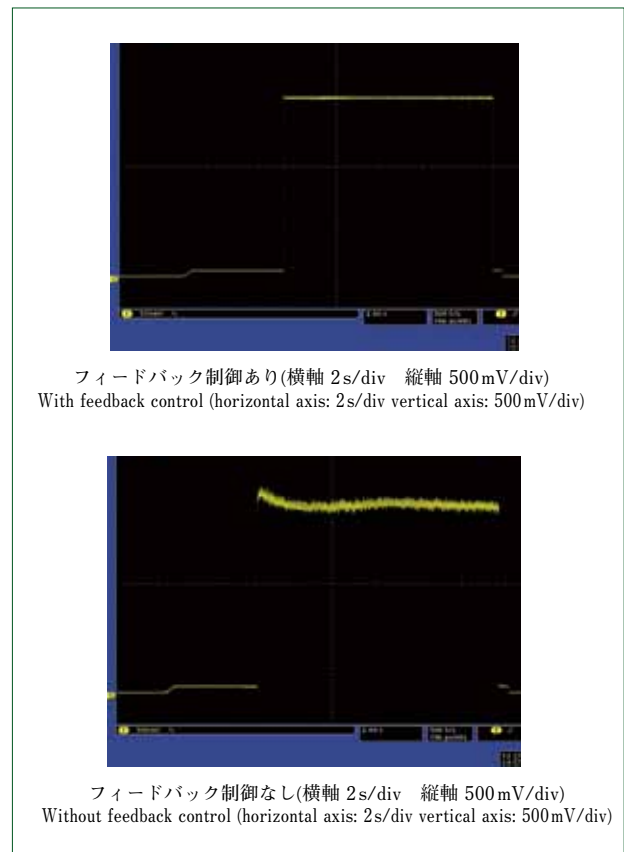


図7 ビーム強度(ビーム電流値)の比較
Comparison of beam intensity (beam current)

(3) デジタル演算ユニット

フロントエンド回路から送信されてきた位置センサ部におけるビームの強度信号を取り込み、ビーム位置と形状をリアルタイムで計算して求める。

3 性能評価

3.1 ビーム強度安定化

独立行政法人国立がん研究センター東病院でビーム強度安定化試験を実施した結果を述べる。

仕様範囲のビーム強度範囲におけるビーム強度は、ビーム強度平均値に対して、安定度 $\pm 1.0\%$ 以内であることを確認した。図7に、ビーム安定化制御のあり/なしによるビーム強度の変動を示す。縦軸はビーム強度、横軸は時間を示す。ビーム安定化を行った場合、ビーム強度安定度の要求値 1% 以内に対して、安定度は 0.4% の変動幅に収まっている。

3.2 ビーム位置モニタ

独立行政法人国立がん研究センター東病院でビーム位置モニタの試験を実施した。ペンシルビームの移動パターンは、

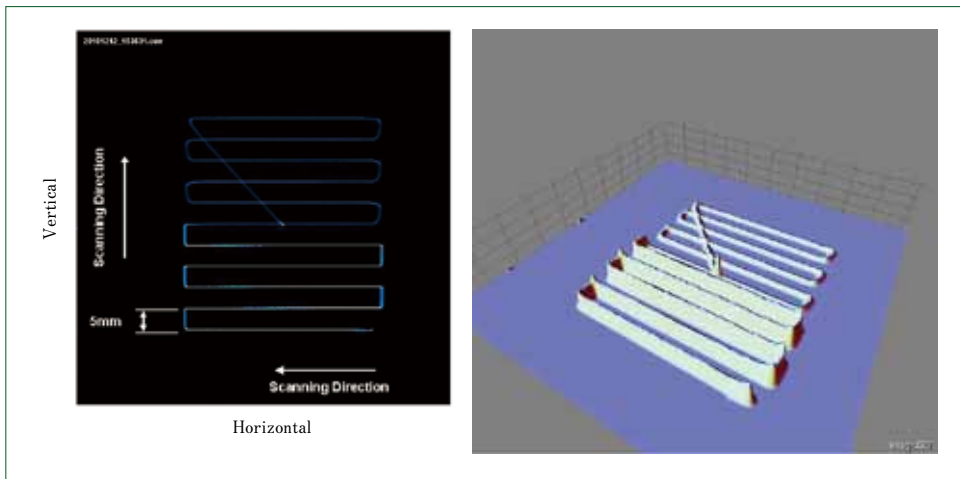


図8 ビーム位置モニタによるビームスポットの移動測定
Measurement of beam spot scanning

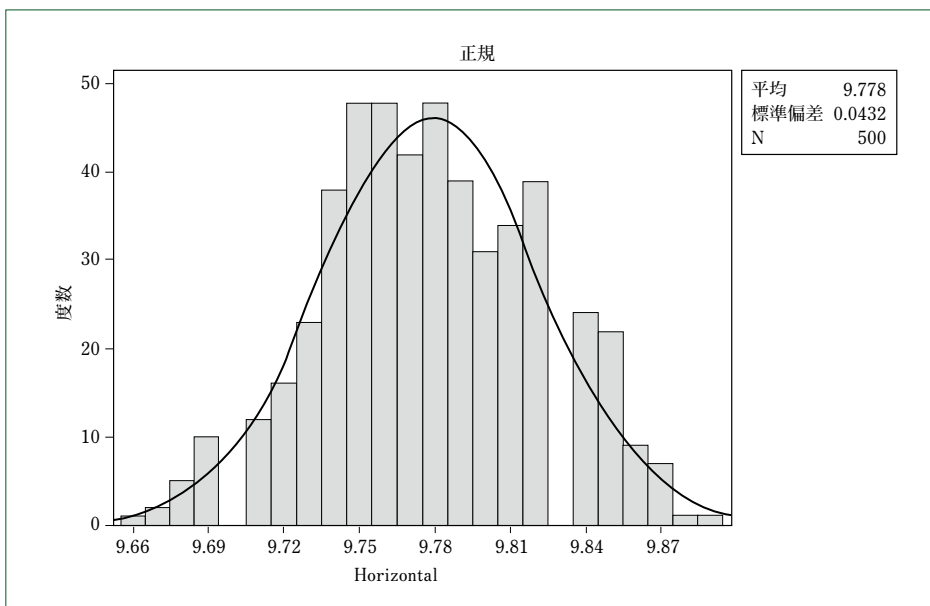


図9 ビーム位置モニタによるビーム位置変動評価
Evaluation of beam distribution during scanning

照射面が正方形の形状になるものを作成した。試験ではペンシルビームを走査させ、ビームスポットの移動データを取得した。ペンシルビームの移動データを2次元平面で表示したデータを図8に示す。

試験の結果、ペンシルビームスポットの中心(重心)が移動していく様子が認められた。また走査の途中で走査速度を変更した場合、ビーム強度が一定であることから、照射面上ではペンシルビームの走査速度に応じて照射強度の濃淡が現れるが、その様子についても正しくモニタできることを確認した。

さらに、走査中のペンシルビーム位置の測定精度は $50\ \mu\text{m}$ 以下であることを確認した(図9)。

またビーム位置モニタでは、ペンシルビームの中心(重心)をモニタすると同時に、ペンシルビームの形状の測定も可能である。

4 むすび

(1) 本開発では陽子線治療装置の高精度化の一環として次

の項目を取り上げ、試験により良好な結果を示すことを確認した。

- ・ビーム強度の安定化制御
- ・ビーム位置モニタによるビーム位置検知

(2) 本成果は2011年後半から開始される実際の治療に用いられる予定であり、陽子線治療装置を用いたがん治療の普及を加速するものとして期待される。

高安定度電磁石電源のデジタル制御

Digital Control of a High Stability Magnet Power Supply

●一色 翼*
Tsubasa ISSHIKI



高安定度電磁石電源
High stability magnet power supply

当社の電源は、がん治療用陽子線治療装置をはじめ、さまざまな装置性能発揮の安定した電力供給源として重要な役割を担っている。当社の電源の主回路は、スイッチング方式(デジタル方式)を採用しているが、制御の心臓部である電流フィードバック制御は依然アナログ方式を使用している。

当社は、今後グローバル市場で事業を拡大していくため商品力を強化させる必要があった。その一環として、電源のさらなるコストダウンを推進するべく、アナログ方式であった電流フィードバック制御をデジタル化した。そして、実機電源にて検証試験を実施した結果、電源の主仕様である安定度を確保できることが確認された。

最も速い追従速度を必要とするがん治療用陽子線治療装置向けビームスキャン電源に対して、デジタル化に使用するデバイスのサンプリング周期が十分高速であることから、他の電源のデジタル化にも標準的に適用可能であると判断できた。

今後、デジタル方式の電源の適用を広げ、標準化を図ることにより、装置全体のコストダウンに大きく貢献できるものと考えます。

Power supplies designed and manufactured by Quantum Equipment Division have been used as key components to draw the highest performance from our products, including cancer treatment proton therapy systems. Although digital switching devices have been used in the main circuit of our power supplies, the current feedback circuit, which is the heart of the power control, still features analog design. We judged it necessary to improve the product appeal of the power supplies in order to develop our business worldwide. Hence, we developed a digital current feedback circuit to achieve cost reduction, downsizing and reduced test and adjustment period. After the verification test was implemented by using actual power supplies, it was proved that the current stability, which is a key performance parameter of power supplies, conformed to the required specifications and both cost reduction and downsizing were also achieved. As the digital current feedback circuit offers a sufficiently short sampling period in the beam scanning power supplies that are designed for the cancer treatment proton therapy system and need the fastest current feedback speed, we judge that other power supplies can be digitalized in the same manner as the power supplies discussed herein. We believe that developing the digitalization of power supplies and standardization of digitalized power supplies will contribute to substantial cost reduction of our products.

1 まえがき

当社では、がん治療用陽子線治療装置、医療診断用PET装置、研究用加速器、成膜装置およびリフティングマグネッ

トなど、さまざまな用途に使用される装置を製造している。直流安定化電源は、いずれの装置に対しても装置性能を発揮する安定した電力供給源として重要な役割を担っている。

当社では、2000年以降、装置の商品力向上を目的として

表1 電磁石電源の主仕様
Specifications of magnet power supply

電 源 名	定格電流 (A)	定格電圧 (V)	追従速度 (0A から定格電流まで) (ms)	安定度 (ppm/℃)
HM メインコイル電源	170	155	250 以下	20 以下
ビームスキャンング電源	491	763	1 以下	—

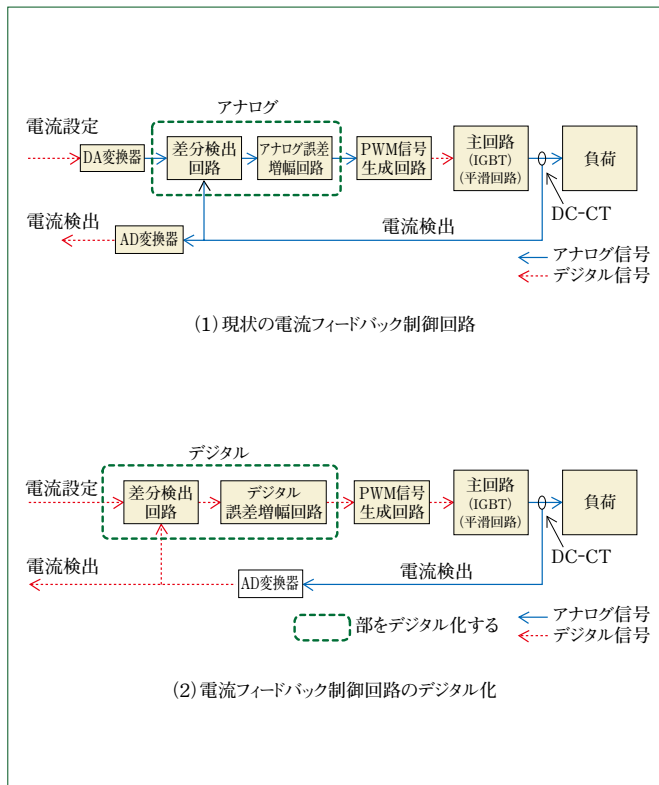


図1 電流フィードバック制御のデジタル化
Digitization of current feedback control

電源の内製化をはじめ、現在ではほとんどの機種の電源を自社で設計から製造まで行っている。2011年2月現在、1400台を超える内製化電源の納入実績を持ち、その大部分が1～100ppm/℃の安定度を備えた直流安定化電源である。一般に電源は主回路部と制御部で構成される。内製化当初の主回路はトランジスタを使ったドロップ方式であったが、現在はIGBTなどの半導体素子を使ったスイッチング方式を採用し、コストダウン、コンパクト化および高効率化などの品質改善を行うことができた。しかし、制御の心臓部である電流フィードバック制御は、依然複雑で高価なアナログ方式によるものであった。当社は今後、がん治療用陽子線治療装置に代表される、これまで国内中心であった市場を海外中心に拡大するべく、キーコンポーネントである電源に対しさらなるコストダウンや製作工程の短縮を行い、装置の商品力を向上させる必要があった。そのことから、アナログ方式の電流フィードバック制御を市販のデバイスを使ったデジタル方式に変え、次の利点などによりコストダウンおよび製作工程の短縮を図った。

- ・ 負荷条件に合わせ制御定数を単にプログラム上の値を変更するだけで調整できる
 - ・ ノイズや負荷特性の変動に、フィルタ処理を行うプログラムを追加し、容易に対策できる
- さらに、デジタル化を当社の他の電源へも標準で適用し、電

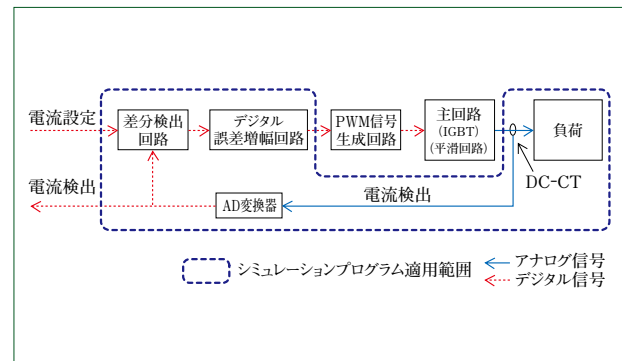


図2 シミュレーションプログラムの適用範囲
Application of the simulation program

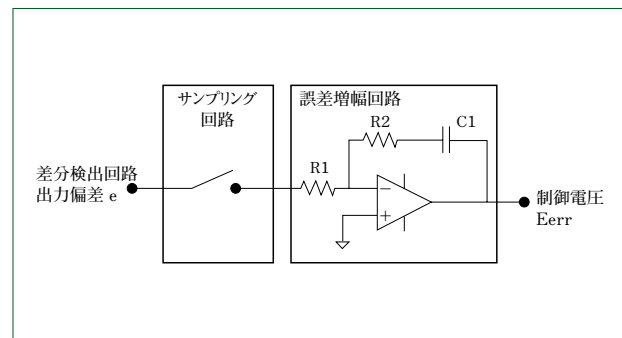


図3 デジタル誤差増幅回路
Digital error amp. circuit

源単体としても、最新の技術を取り入れたコスト競争力を持つ商品としてグローバル市場へ投入していく予定である。デジタル化を標準で適用するには、使用するデバイスが安価な汎用品であること、かつさまざまな電源の要求仕様が満たされる必要がある。

当社は、内製化電源の中でも特に高い仕様が要求される医療診断PET装置用小型サイクロトロンの主電磁石用電源(HMメインコイル電源)と、がん治療用陽子線治療装置のビームスキャンング用電源を取り上げ、その仕様を満足するようデジタル化設計を行うことにした。表1に、各々の電源の主仕様を示す。

本報では、デジタル化の優れた機能を実現させる第一歩として、デジタル化した電流フィードバック制御をHMメインコイル電源に適用し、要求仕様に対する評価試験を行い、検証した結果を記述する。次に、がん治療用陽子線治療装置のビームスキャンング用電源に対し、今回デジタル化を目的に作成したシミュレーションプログラムを使い、評価した結果を記述する。

2 電流フィードバック制御のデジタル化

現状の電流フィードバック制御は、図1(1)に示すアナログ方式を採用している。これをデジタル化すると、図1(2)で示すブロック構成となる。

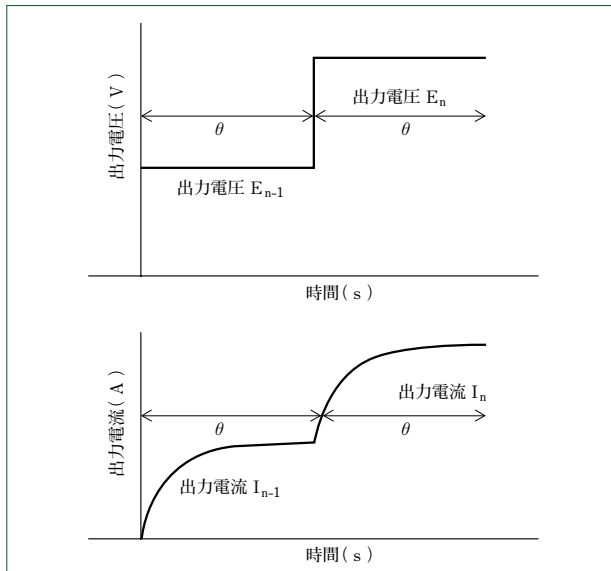


図4 負荷の出力電流
Load output current

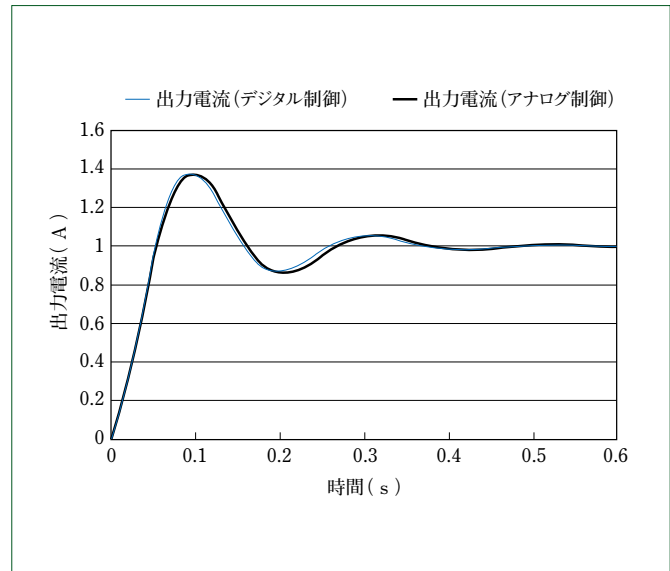


図5 過渡応答のシミュレーション結果
Simulation results of transient response

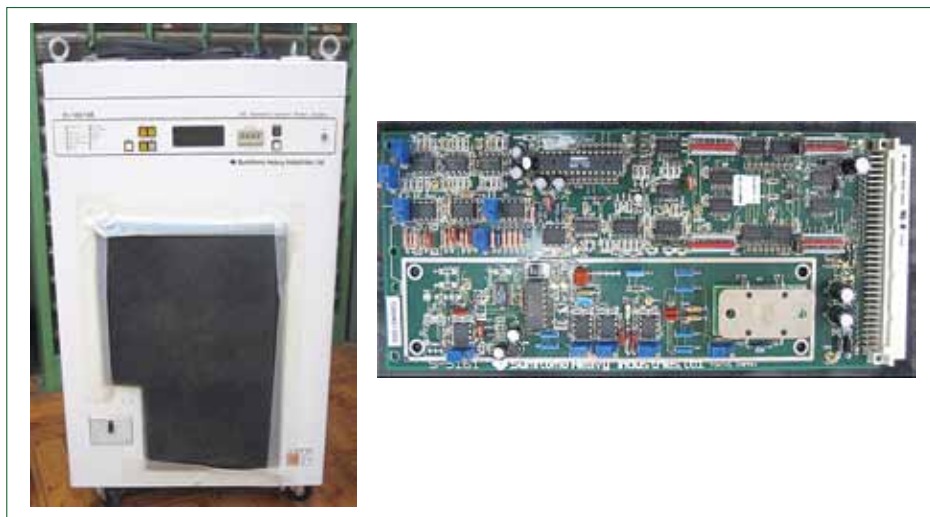


図6 HMメインコイル電源(左), 誤差増幅回路基板(右)
Main coil power supply for HM cyclotron (left), and error amp. board (right)

2.1 デジタル電流フィードバック制御の設計

図1(2)で示すデジタル化した電流フィードバック制御回路の設計を行うべく、Microsoft Excelを使用した回路シミュレーションプログラムを作成した。図2で示すとおり、本プログラムは差分検出、デジタル誤差増幅、電流検出およびAD変換機能をシミュレーションするものである。

2.1.1 差分検出

AD変換された電流検出値と設定値の差分を偏差として、デジタル誤差増幅回路に入力する。

2.1.2 デジタル誤差増幅

図3に示すとおり、デジタル誤差増幅回路は偏差 e を一定周期でサンプリング入力し、電圧を出力する。デジタル誤差増幅回路の出力 E は式(1)で表される。ここで θ はサンプリング周期である。このように、デジタル誤差増幅回路の出力は、サンプリングごとの偏差とサンプリング開始から現在までサンプリングしたすべての偏差の合計によって計算される。

$$E = \frac{R_2}{R_1} \left(e_n + \frac{\theta}{C_1 R_2} (e_n + e_{n-1} + e_{n-2} + \dots) \right) \quad (1)$$

2.1.3 電流検出

デジタル誤差増幅回路の出力である出力電圧はステップ信号である。出力電流は、負荷の特性から1次遅れ系のステップ応答となり、式(2)で表される。 R は負荷の抵抗値、 L は負荷のインダクタンス値となる。

$$I = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \quad (2)$$

出力電圧はこのステップ信号の連続である。デジタル誤差増幅回路が1回目のサンプリングを行い出力し、さらに2回目のサンプリングを行い出力したとすれば、出力電流は図4のようになる。サンプリング n 回目の出力電流の計算式は式(3)となる。

$$I_n = \frac{E_n - E_{n-1}}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}\theta} \right) + I_{n-1} \quad (3)$$

2.1.4 AD変換（アナログからデジタルへの変換）

電流フィードバック制御をデジタル化するに当たり、アナログ値である電流検出をAD変換器によりデジタル化する。

表2 安定度測定結果
Results of current stability measurement

方式	電流変化率	温度変化量 (°C)	安定度 (ppm/°C)
アナログ	13×10^{-6}	1.7	7.65
デジタル	15×10^{-6}	1.8	8.33

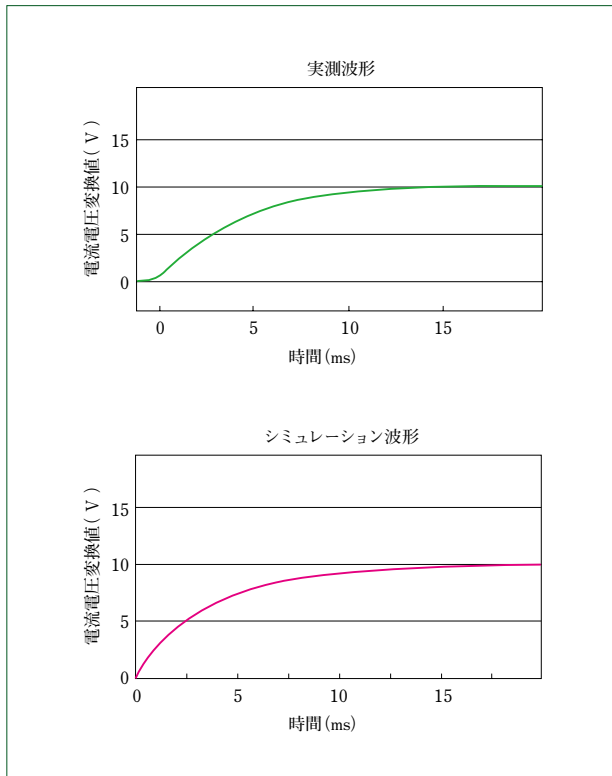


図7 出力電流波形の比較
Comparison of the output current waveform

2.2 シミュレーションプログラムの検証

2.1のデジタル化した電流フィードバック制御回路のシミュレーションプログラムを検証するに当たり、電流設定値1Aのステップ信号を入力したときの出力電流の過渡応答を、市販のシミュレーションソフトICAPSを使用して比較評価した。その結果、両者の過渡応答は一致した(図5)。

3 実機検証

2.1のデジタル化した電流フィードバック制御が組み込まれた誤差増幅回路基板を搭載したHMメインコイル電源を使用し、評価した(図6)。

3.1 安定度

HMメインコイル電源の出力電流の安定度を測定した。安定度とは、デバイスの環境温度に対する出力電流値の安定性であり、温度変化1°C当たりの出力電流変化量から求められる。測定の結果、安定度は8.33ppm/°Cと表1に示す要求仕様(20ppm/°C以下)を満たし、アナログ方式を使った測定結果とも同等であることが確認できた(表2)。

3.2 シミュレーションプログラムの確認

2.1で作成したシミュレーションプログラムを評価するべく、模擬負荷を使用し、HMメインコイル電源の出力電流応答時間の実測波形と、シミュレーションプログラムにより求めた

応答時間の波形を比較評価した。その結果、両者がほぼ等しい時定数で応答していることが分かった(図7)。

4 内製化電源への適用

3章の実機電源に使用した誤差増幅回路基板には、アナログ方式で使用している複雑で高価な回路を使用せず、デジタル化した電流フィードバック制御を組み込んだ市販の安価なデバイスが搭載されている。内製化電源の中で最も速い追従速度を必要とするがん治療用陽子線治療装置のビームスキャン用電源に対し、2.1のデジタル電流フィードバック制御のシミュレーションプログラムを使用し、必要なサンプリング周期を計算した結果50μsとなった。このレベルのサンプリング周期に対応できるデバイスも市販で容易に入手できる。

以上の結果、デジタル化した電流フィードバック制御がすべての内製化電源にも標準で適用できるものとする。

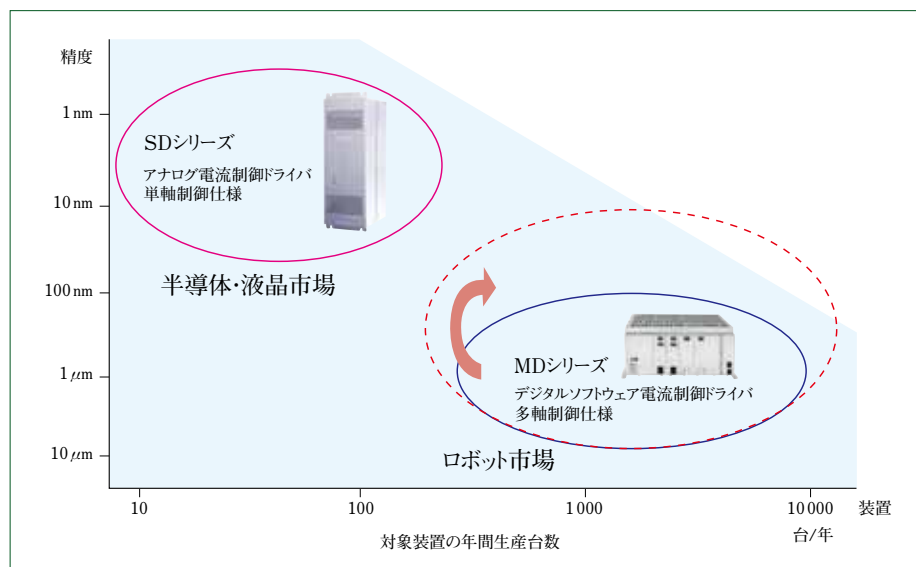
5 むすび

- (1) アナログ方式の電流フィードバック制御をデジタル化した。出力電流の過渡応答をシミュレーションした結果、アナログ方式の応答と同等となることが確認できた。
- (2) デジタル化した電流フィードバック制御を実機電源に組み込み試験評価した。その結果、電源の主仕様である安定度を満たすことが確認できた。
- (3) 電流フィードバック制御をデジタル化することにより、制御部のコストダウンが可能となった。

デジタルハードウェア電流制御の開発

Development of The Digital Hardware Current Control

●安 武 知 治*
Tomoharu YASUTAKE



ハードウェアデジタル電流制御による性能分布
Distribution map of hardware digital current control performance

1 はじめに

当社の保有するサーボドライバは、SDシリーズに代表されるアナログ電流制御ドライバと、MDシリーズに代表されるデジタルソフトウェア電流制御ドライバに大別される。冒頭の図に示すように、アナログ電流制御ドライバは応答性などの性能を重視した設計となっており、半導体・液晶といったハイエンド市場向け製品となっている。一方、デジタルソフトウェア電流制御ドライバは、コストを重視した設計となっており、ロボット市場などの量産市場向けの製品となっている。

近年、ロボット市場においても、さらなる高タクト化や高精度位置決めなどの性能向上要求が出てきており、MDシリーズの性能向上が必要となっている。またMDシリーズにアナログ電流制御と同等の性能を実装できれば、より高性能を要求される半導体および液晶市場にも投入することができる。MDシリーズの特長である低価格でコンパクトという利点を活かすことができ、顧客の要求にこたえることが可能となる。

本報は、これらの顧客要求を満たすことのできるデジタルハードウェア電流制御機能に関するものである。本機能を開発し、MDシリーズに組み込み、性能向上を実現させた結果に関して報告する。

2 MD ドライバ

MDシリーズは、産業用ロボットや半導体実装機などの産業機械への組み込み用に特化した多軸制御サーボドライバである。

2.1 主要仕様

電圧範囲 三相AC170～240 V

容量範囲 0.1 kW～2.0 kW
出力定格電流 1.7～12.5 A
制御方式 IPMによるPWM方式(三相正弦波駆動)
概略寸法 30～90(W)×94(D)×185(H) mm

2.2 特長

図1に、MDシリーズのシステム構成例を示す。

- (1) 単軸制御の汎用製品と比較し、産業機械への組み込み用に特化することで、電流制御ドライバとしての小型化および省配線化を実現。
- (2) 当社製のCPUモジュール、コントロールモジュールと組み合わせることで、高速・高精度な位置決めが可能。また、コントローラモジュールを装置仕様に合わせてカスタマイズすることで、トータルコストの低減、小型化および省配線を実現。
- (3) 専用の調整支援ソフトを使用することで、全軸の一括モニタおよびパラメータ調整が可能で、効率的なセットアップおよびメンテナンス作業を実現。

2.3 電流制御ループ

図2にMDシリーズの電流制御ループの概略を示す。モータに流れる三相電流検出値をADコンバータから取り込み、三相二相変換を実行し、直流座標においてPI制御を行う。PI演算の結果として電圧指令が生成され、この指令に二相三相変換を行い、PWM三角波比較器に出力し、フィードバック制御を行う。

3 デジタルハードウェア電流制御

デジタルハードウェア電流制御は、アナログ電流制御の持つ高応答性とデジタルソフトウェア電流制御の持つ簡易性を兼ね備えた制御方式である。この制御方式を実現させるべく、

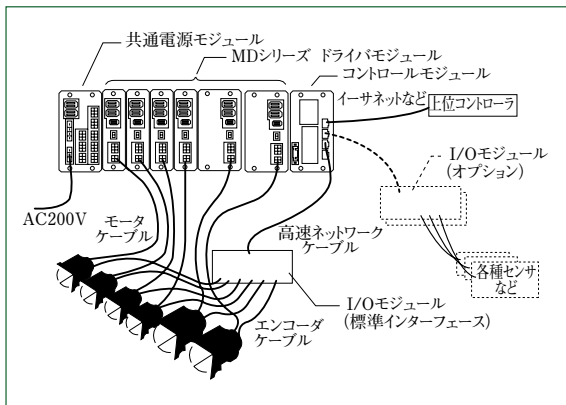


図1 システム構成例
System configuration example

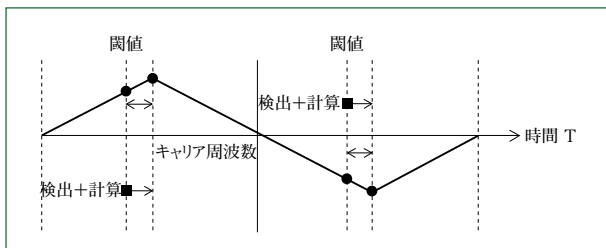


図3 電流制御タイミング
Current control timing

FPGAを用いてデジタル回路で電流制御ループを構成した。FPGAはロジック回路をブロックごとに構成することが可能であることから信号処理の並列性が高く、高速演算を行うことが可能である。FPGAを用いることにより、電流制御処理時間が短縮され、アナログアンプのような高応答性の実現が可能である。

更にデジタル制御で問題となるサンプル無駄時間を削減し、電流制御の安定性および応答性を向上させた。従来のデジタルソフトウェア電流制御処理では、電流のサンプル後、電圧出力は座標変換や制御演算を行うことで、1サンプル周期の制御遅延が生じてしまう。この制御遅延は単に電流追従の位相遅れを引き起こすだけでなく、電流フィードバック系に対して安定性の低下を引き起こす原因となる⁽¹⁾。

図3に、この制御遅延を削減する方策を示す。図3のシステムにおいて電圧出力の更新は三角波の頂点で行われる。従来の制御方式では、三角波の頂点で電流をサンプルし、その後制御演算を行っており、1サンプルの遅延を生じさせる結果となっていた。そこで三角波の頂点の数 μ s手前で電流をサンプルし、FPGAによる高速演算にて三角波頂点に至るまでに演算を完了させた。本方式により、1サンプル無駄時間を削減し、電流制御の安定性および応答性を向上させることができる。なお、本方式は特許申請中である。

4 デジタルハードウェア電流制御応答性検証

MDシリーズにデジタルハードウェア電流制御機能を実装し、電流制御ループの応答性を向上させた結果に関して報告する。図4に、デジタルソフトウェア電流制御とデジタルハードウェア電流制御のボード線図を示す。デジタルソフトウェア電流制御の電流周波数帯域は、約1.5kHzとなっている。一方のデジタルハードウェア電流制御の場合は、約5~6kHz

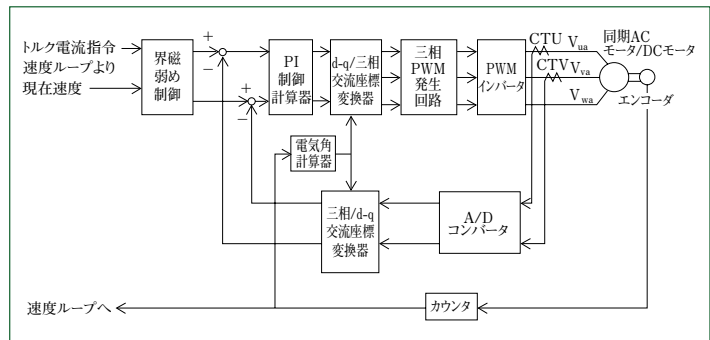


図2 電流制御ループブロック図
Current loop block diagram

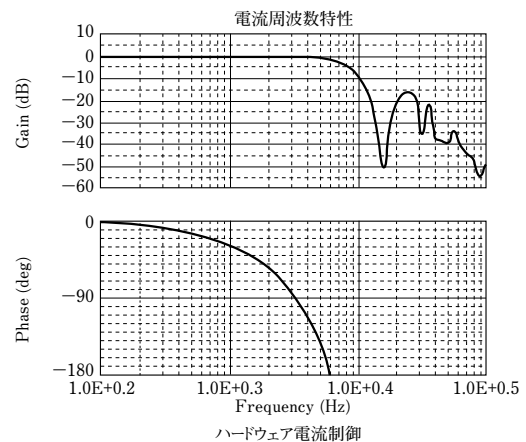
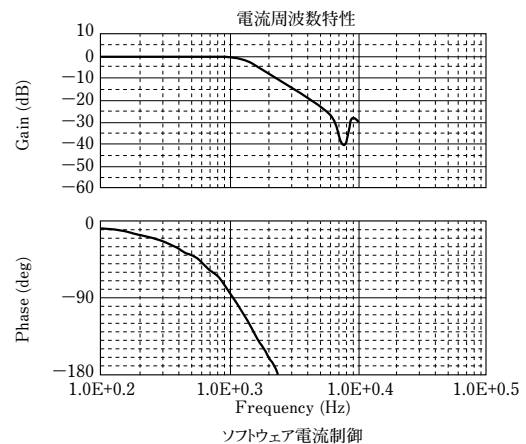


図4 電流周波数特性
Current gain and phase vs frequency

ほどの帯域を得ることができており、デジタルハードウェア電流制御方式の有効性が実証された。

5 おわりに

デジタルハードウェア電流制御機能を開発し、当社MDシリーズに適用した。その結果、従来のデジタルソフトウェア電流制御方式と比較し、3倍程度の電流応答性を得ることができた。今後、本機能を他のシリーズにも適用拡大を行い、顧客要求にこたえていく所存である。

(参考文献)

- (1) 樋口龍雄. 自動制御理論, 森北出版. 1989, p.112~116.

M7制御プラットフォームの搬送制御システムへの適用

M7PF Application to Transportation Control System

● 福 嶋 弘*
Hiroshi FUKUSHIMA



M7制御プラットフォーム
M7 control platform

1 はじめに

多くの製造装置において、スループットの向上は性能改善の上位項目となっている。なかでも製造工程内での物品の搬送時間は、生産を行っていない無駄時間となることが多く、これを短縮できれば最終製品の品質に影響を与えずスループットを向上させることが可能である。

搬送時間は、搬送経路、搬送速度および搬送装置間の受渡し時間などの影響を受けるが、これらの要素を最適化するのに求められているのは、装置を制御するコントローラの性能である。

このような搬送時間の短縮要求に対応するべく、当社のM7制御プラットフォームを用いて、搬送用途に特化したモーションコントローラ用ソフトウェアを、当社独自の「MuSec (Micro processing Unit SEquenCe programing environment)」開発環境を用いて開発した。

本報では、この搬送用モーションコントローラの機能および性能面での特徴を中心に紹介する。

2 搬送経路の短縮

搬送用途において、搬送経路は障害物への干渉を避けることができれば途中の経路を厳密に定義する必要はない。よって、物品を搬送する経路に経由点がある場合、経由点の近傍をショートカットして次の目標位置へ向かわせることが可能である。

ショートカット量は経由点から手前の距離で設定し、本機ではこの動作をパス動作、ショートカット量をパスエリアと呼んでいる(図1)。

本機は、従来機と比較してこのパス動作に関する設定の自由度を高めた。このことで、経由点ごとに任意のパス動作が設定でき、さらに多軸ロボットにおける関節座標系と直交座標系のような、経由点の前後で移動の座標系が異なる場合にもパス動作を適用することができる。また、パス動作中は移動速度の低下も抑制できることから、搬送時間短縮への効果は非常に高いものとなっている。

図2に、実際にパス動作をウェハ搬送で適用した例を示す。

3 加速時間の短縮

搬送時間を短縮するうえで、移動速度は速い方がよいのは明らかであるが、最高速度域に到達させるまでの加速時間は使用するモータが発揮できるトルクによって左右される。

加速では、速度の増加に伴う動摩擦の増大により高速領域で最もトルクを必要とするため、低中速領域に合わせて加速度を大きくすると高速領域でトルクが不足し制御不能に陥ってしまう。

本機は、従来機と比較して加減速設定の自由度を高めたことで、高速領域の加速度にリミットをかけつつ、低中速領域の加速度を大きく設定することができる(図3)。

図4に、加速度リミットの設定の有無によるモータトルクの大きさの違いを示す。

加速度リミットなしで加速度を大きくしていった場合、先に高速領域でモータトルクが最大に達して制御不能に陥り、それ以上加速度を大きくすることができない。一方、加速度リミットありの場合は、高速領域の加速度をリミットで制限しつつ、低中速領域の加速度をさらに大きくすることができる。

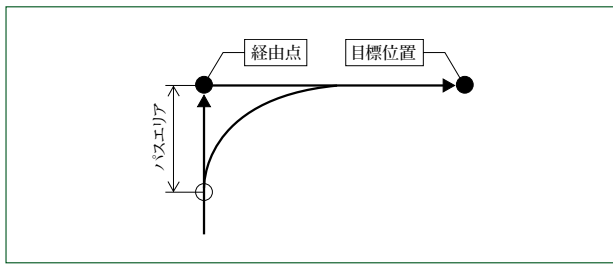


図1 パス動作
Passing operation

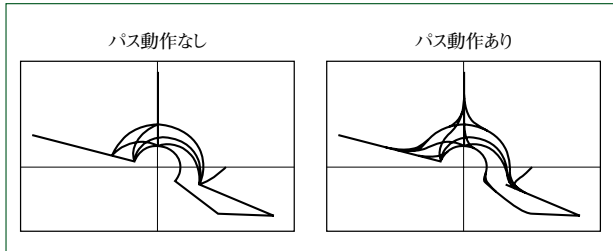


図2 パス動作の効果
Effect of passing operation

このように、加速中の全域でモータトルクを有効に利用した加速ができ、加速時間を短縮して最高速度域を有効に活用することができる。さらにこれらの設定は動作ごとに行なえるため、常に最良の加速・減速が可能である。

4 適用例

図5に、実際の搬送装置に本機を適用し、パス動作及び加速度リミットの有無によるスループットの差を計測した結果を示す。スループットで21.9% (25.704s→20.07s)の短縮効果があり、これら機能の有効性が確認できる。

5 受け渡し時間の短縮

本機は、1台で搬送装置を最大3台まで同時に制御できることから、装置間で同期をとりながら物品の受渡しを行うことができ、待合わせなどでの無駄時間の削減が可能である。

6 カスタマイズ性の向上

MuSec開発環境の特長として、プログラムが視覚的にとらえやすいこと、プログラムをモジュール化しやすいこと、デバック情報画面を構築しやすいことがあげられる。

本機は、これらの特長を活かして、対象装置ごとに搬送シーケンスが異なっても、ユーザ自らが機能をカスタマイズし、対応することが可能である。これによって画像処理装置などと組み合わせた位置の補正動作などの追加も容易に行える。

7 今後の開発計画

本機では、スループットの向上に有効な機能の開発を優先して行ってきたことで、設定の自由度が高いかわりに使いこなすことが難しくなっている。現在、これらの機能を簡単に使用できるユーザ支援ソフトウェアを開発中である。

8 おわりに

(1) 当社のM7制御プラットフォームを用いて、搬送用途

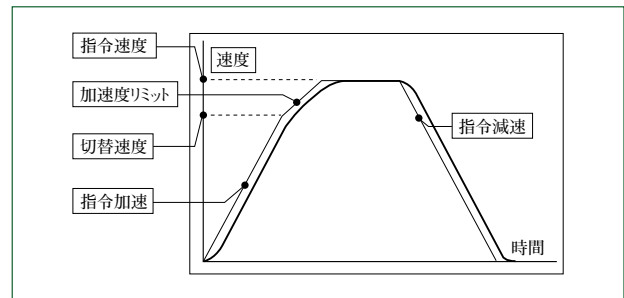


図3 加減速設定
Acceleration and deceleration setting

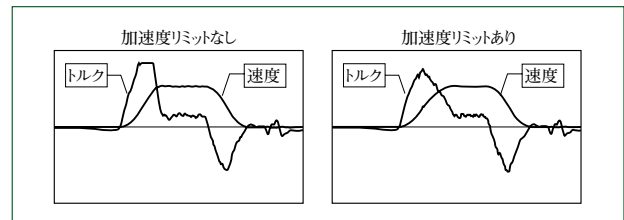


図4 加速度リミットの効果
Effect of acceleration limit

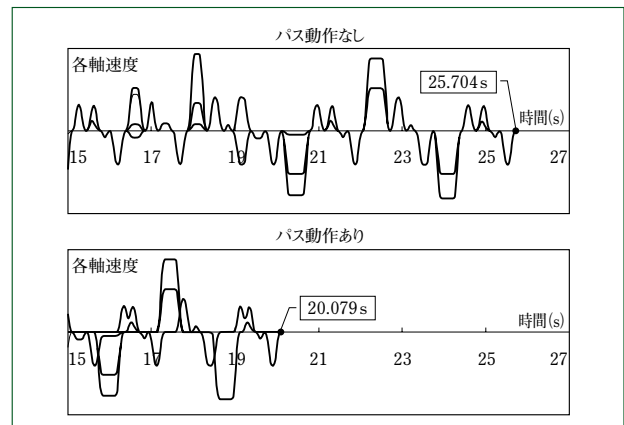


図5 スループット向上
Throughput improvement

に特化したモーションコントローラ用ソフトウェアを開発。

- (2) 自由度の高いパス動作により搬送経路の短縮が可能。
- (3) 加速度リミットにより加速時間を短縮し、最高速度域の有効活用が可能。
- (4) 搬送装置に適用しスループット改善を実証。
- (5) 搬送装置間の同期による待ち時間の削減が可能。
- (6) MuSec開発環境の採用により、ユーザ自ら機能をカスタマイズすることが容易。

(参考文献)

- (1) 鳴海 隆,白石貴司.ロボットコントローラ98MPの開発.住友重機械技報,no.140,Aug.,1999, p.21~24.
- (2) 池本雅俊,鳴海 隆.モーションプラットフォームMPシリーズ.住友重機械技報,no.152, Aug.,2003,p.17~20.

M7制御プラットフォーム研削盤用 CNCへの適用

M7PF Application to CNC Grinder

● 島 田 昇*
Noboru SHIMADA



CNC研削盤
CNC grinder

1 はじめに

研削盤の生産性を向上させる必要条件の一つに段取り替え時間の短縮がある。この実現のためには、加工対象物ごとに必要となる加工プログラムの作成や加工条件の設定に要する時間を短縮する必要がある。

本報では、研削盤固有の動作や操作を整理し、当社のM7制御プラットフォームを用いて開発した研削盤用CNCの特長であるシーケンスプログラミング機能、タッチパネル機能、および内部ソフトウェアの構造について述べる。

2 研削盤の動作と操作の特長

図1に、研削盤の動作例を示す。これは加工対象物の上面研削の代表的な動作で、加工プロセスは①下降(切込み)、②時間待ち、③横移動(研削)の3つの動作の繰り返りで構成されている。

この動作は自由曲線を含まない直線動作の組み合わせであり、他の汎用工作機と比較すると単純であるという特長がある。このことから加工条件の入力方法は、マシニングセンタなど他の工作機のようなCADデータのダウンロードではなく、装置の操作画面を使っでの動作パターン選択および各種数値情報の入力を行うことが一般的となっている。

3 シーケンスプログラミング機能

工作機に使用されるCNCは、一般にシーケンスプログラム記述言語としてG/Mコードが使用されている。G/Mコードを使い慣れているユーザも多く、特に装置の立上げや試運転に必要な単純動作を簡単にプログラミングできるというメリットがある。一方で、装置の生産性を向上させる特長的な

動きを組み込むには、機能的な制約が生じる場合があるというデメリットもある。

(1) プログラミング言語

今回開発した研削盤用CNCには、プログラミング言語として従来のG/Mのコードに加え、固定的なシーケンス記述用に当社独自の「MuSec(Micro processing Unit SEquenCe programing environment)」言語を搭載した。

MuSec言語は、プログラムを図形で記述する言語で、処理の流れを直感的にとらえやすいという特徴を持っている。

図2に、図1の動作をMuSec言語で記述したプログラム例を示す。研削動作を構成する4つの動作要素は動作順に矢印で結ばれており、シーケンスの入れ替えや動作の追加は、線のつなぎ変えや図形の追加で容易に行うことができる。これはプログラムの作成やデバッグを容易にするだけでなく、作成済みのプログラムの保守も容易になるというメリットがある。

(2) ソフトウェア構造

図3に、本機能を実現しているソフトウェアの構造を示す。

ソフトウェアは、研削に使用される複数の加工パターンを記述したサブシーケンスプログラム群と、それらを読み出すメインシーケンスプログラム群から構成されている。それぞれの加工パターンは、G/Mコードからも呼び出し可能な構造となっている。なお、加工条件の設定を容易にするための特長的なティーチング・プレイバック機能もメインシーケンスプログラムの一つとして組み込まれている。

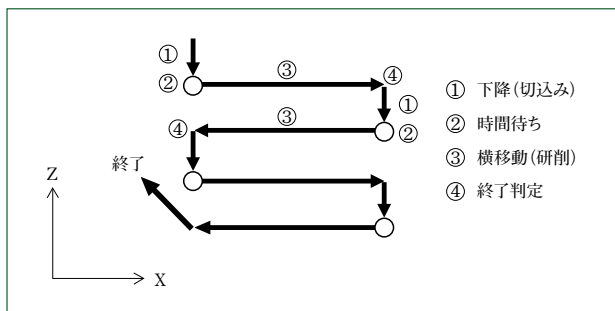


図1 研削動作例
Example of grinding operation

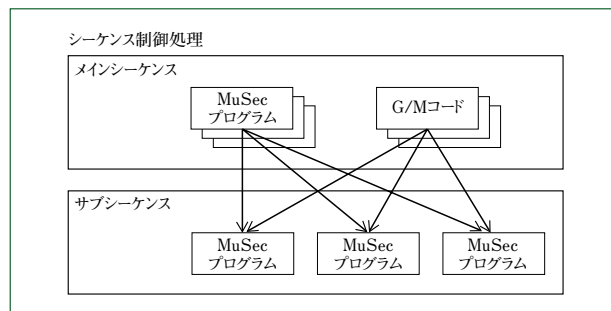


図3 シーケンス制御ソフトウェア構造
Sequence control software structure

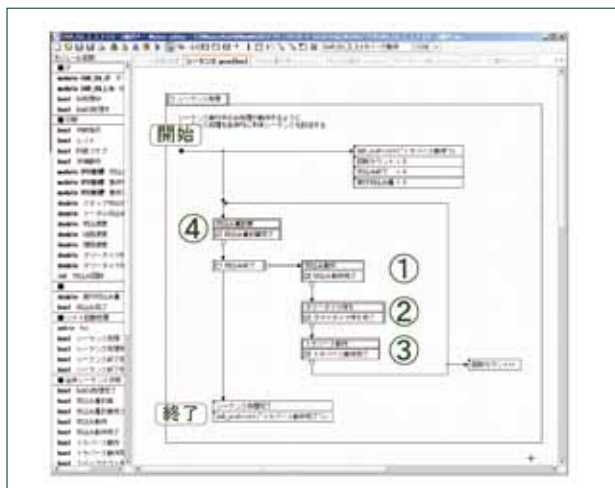


図2 MuSec言語による研削動作記述例
Example of describing grinding operation in MuSec language

4 タッチパネル機能

本CNCは表示操作用にタッチパネルを搭載している。

あらかじめ組み込まれている操作画面は、オペレータの操作を容易にするべく、入力操作が必要な項目のみ表示される対話式となっている。また、入力操作を削減するために、直近の加工条件が再表示される機能も備えている。

このように現時点でも高い操作性を実現しているが、操作画面は装置の使いやすさに大きく影響を与えることから、今後の機能追加が見込まれている。そこで本CNCでは画面内容のバージョンアップが容易に行えるよう、タッチパネル用I/Fのオープン化を図っている。

(1) タッチパネルとCNC本体との通信仕様

タッチパネルとCNC本体の通信仕様に、市販の多くのタッチパネルに搭載されている汎用的な通信プロトコルを採用した。またタッチパネルから見たCNCの内部の表示用レジスタも汎用的な仕様とした。これにより対象とする研削盤に最適なタッチパネルを選択することができる。

(2) ソフトウェア構造

図4に、タッチパネル制御用のソフトウェア構造を示す。

表示用レジスタは制御用と独立に設けた。また、表示用レジスタの操作は、タッチパネルIO処理としても装置制御処理から独立させた。これによって、画面作成者は画面デザインだけでなく、画面に表示するデータの種

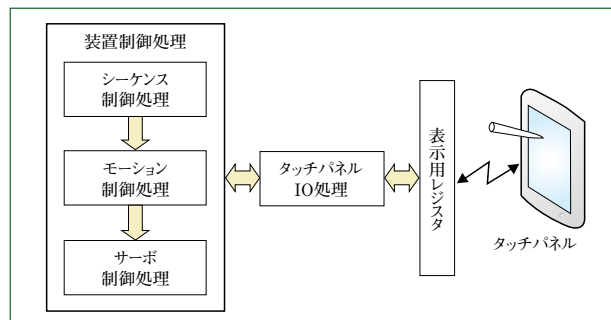


図4 タッチパネル制御プログラム構造
Touch panel control program structure

類まで容易にカスタマイズすることができる。

5 おわりに

本報ではM7制御プラットフォームの適用事例として次の特長を持つ研削盤用CNCを紹介した。

- (1) シーケンスプログラミング言語として、一般的なG/Mコードに加え、プログラムの作成や保守が容易なMuSec言語を搭載した。
- (2) 表示操作用にタッチパネルを採用し、さらに対話式の操作系を実装することによって、加工条件の設定や変更を容易とした。
- (3) 内部のソフトウェア構造をモジュール化し、制御系と表示操作系を分離することで、それぞれの機能拡張を容易とした。

対象装置に特化したCNCは、汎用CNCでは実現困難だった装置の特長を引き出すことができる。本CNCはカスタマイズが容易であり、引き続き多様な装置への適用を図っていく所存である。

(参考文献)

- (1) 古川竜治. テーブル固定立軸円テーブル形平面研削盤SVR70F開発. 住友重機械技報, no. 164, 2007, p. 23~24.

運行管理システム eSNav

eS Navigation System

●吉田 貴志*
Takashi YOSHIDA



図1 ナビゲーションによる作業
Work by a navigation

1 はじめに

工場および配送センターにおける物品の搬送にはフォークリフトなどの有人運搬機が使用されるケースが多く、物品の搬送はフォークリフト作業者の判断に任されているのが実情である。したがって、作業者の熟練度によって、物品の搬送リードタイムに大きな差が発生している。

また、近年では少品種大量搬送から多品種少量搬送へ移行する傾向にあり、搬送リードタイムの短縮が工場および配送センターの大きな課題となっている。このような多品種少量搬送において、フォークリフトを効率よく運行できる運行管理システムへのニーズが高まっている。

本報では、熟練作業者に依存することなく、搬送リードタイムを短縮できる運行管理システムeS (e-System) Naviについて紹介する(図1)。

2 従来の運行管理システム

まず、従来の運行管理システムについて説明する。

WMS (Warehouse Management System)における無線端末を活用した作業ガイダンスは、フォークリフトの位置に関係なく、搬送作業が発生した順に作業者に指示していくのが一般的である(図2)。

この場合、搬送効率は考慮されず、搬送リードタイムを短縮できないだけでなく、作業者の作業量を平準化できない問題がある。

3 eSNavの運行管理

フォークリフトによる搬送リードタイムを大幅に短縮できる運行管理システムeSNavについて説明する。

3.1 システムフロー

eSNavの運用フローは以下のとおりである。

- (1) フォークリフト作業者の作業開始操作をもとにシステムが起動する(図3①)。
- (2) システムはフォークリフトの現在位置をもとに最適作業を検索し、フォークリフト作業者に搬送指示をする。
- (3) 最適作業がない場合は、それを作業者に知らせ、作業者の判断によりeSNavからいったん離れることができる。システムから離れ、他の作業を行うことを可能とし、システムの使用に自由度を持たせる(図3②)。
- (4) eSNavから離れる際にフォークリフトの現在位置を解除し、復帰する場合は現在位置を再度登録する。これによりシステムはフォークリフトの現在位置を正確に把握する(図3③)。

3.2 最適作業の決定

eSNavは次に示す手順で最適作業を決定する。なお、最適作業が見つからない場合は、フォークリフト作業者に対して、別作業を行う選択権を与える。

- (1) 最初に、待ち時間の長い搬送作業がないかチェックし、その作業を優先して選択する。
優先順位の高い搬送作業がなければ、(2)以降の通常の

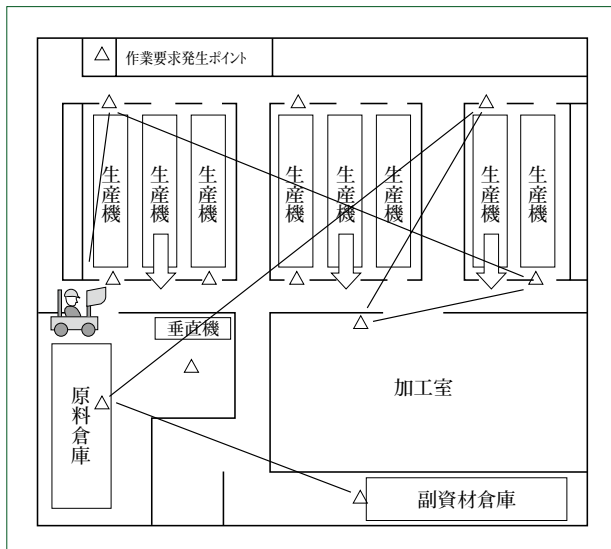


図2 従来の一般的な作業ガイダンス
Conventional work guidance

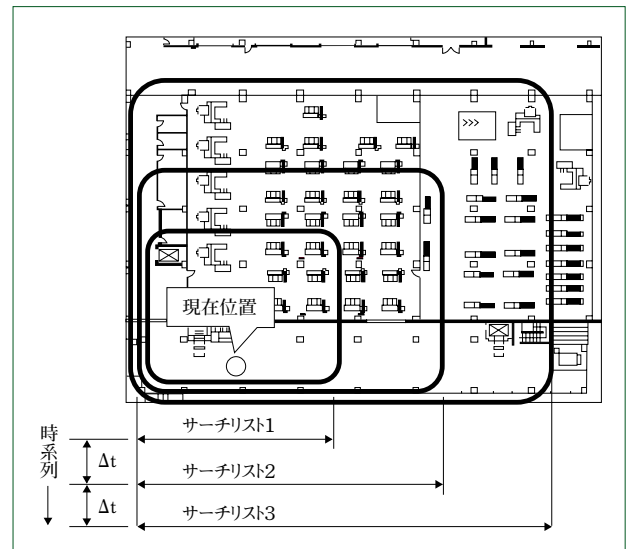


図4 サーチャリスト
Search list

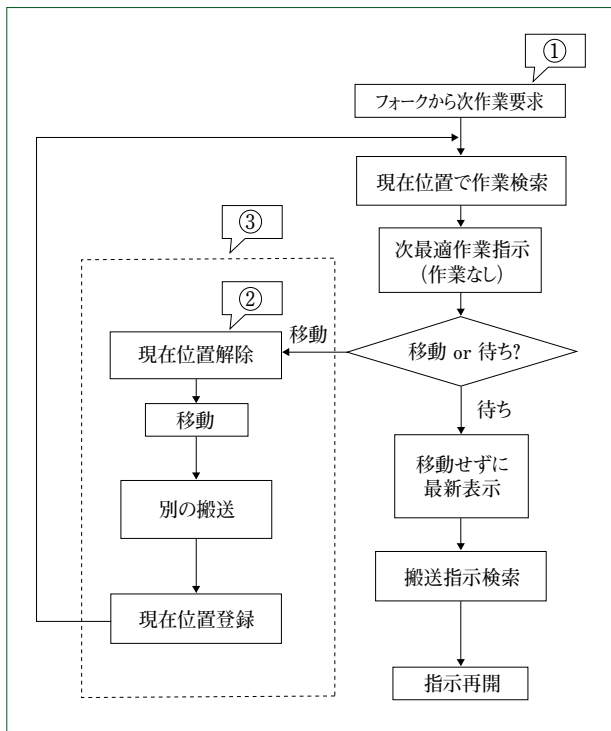


図3 搬送管理システムフロー
Transportation management system flow

検索処理を行う。

搬送作業は待ち時間ごとに、以下のレベルに分類される。なお、同レベル内の搬送作業については、発生順に指示する。

a. レベル1

通常搬送キューと呼び、最も優先順位の低い搬送作業群。

b. レベル2

優先搬送キューと呼び、レベル1より優先順位の高い搬送作業群。

c. レベル3

最優先搬送キューと呼び、無条件に指示される搬送作業群。

(2) フォークリフトの現在位置をもとに検索するエリアを

確定する。

(3) その検索エリア内で指示が可能な搬送作業について、次の搬送作業が終了するまでのフォークリフトの走行距離を算出し、その走行距離が最短となる搬送作業を決定する。

(4) その検索エリア内で搬送作業が見つからない場合は、検索するエリアを段階的に広げる。なお、フォークリフト作業者が検索エリアを選択することも可能とする（図4）。

3.3 システム内の定義

最適作業を決定するべく、以下の情報をシステム内のデータベースにあらかじめ登録する。

- (1) 搬送起点および起点間のフォークリフトの走行距離
- (2) 搬送作業の優先順位をレベル分けするための待ち時間
- (3) フォークリフト作業者の情報（生産性など）
- (4) 検索するエリア

3.4 トレーサビリティ

eSNavでは、搬送する物品をID管理し、いつ・誰が・何をどこから・どこへ搬送したかを記録し、管理できるようにした。

また、作業者の生産性（作業時間・搬送回数）も集計および管理することも可能とした。

4 おわりに

eSNavはフォークリフトの現在位置とデータベースに登録された情報をもとに最適作業を決定し、搬送リードタイムを大幅に短縮できる運行管理システムである。この運行管理システムはフォークリフトだけでなく、配送センターで 사용되는ピッキングカートなどにも適用できる。

実際に工場で検証し、以下の追加機能の実現が今後の課題となる。

- (1) フォークリフトから降りることなく、物品の確認が容易に行える機能。
- (2) フォークリフト作業者が現在位置を車載端末から入力しなくても、自動で現在位置を更新できる機能。具体的には、無線LANによる3点計測方式が有力となる。

くりこみ群分子動力学法を用いた高速構造緩和手法

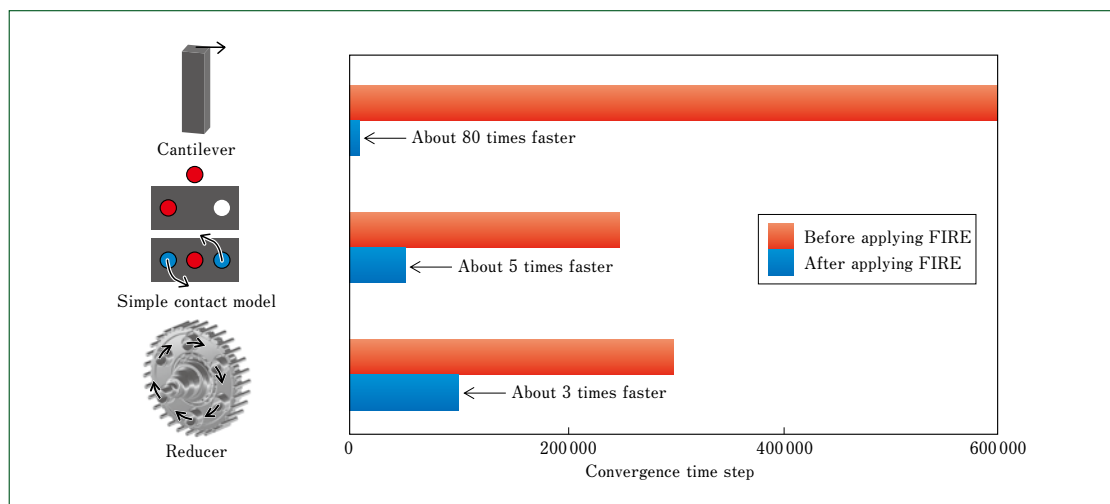
Fast Structural Relaxation Technique Using Renormalized Molecular Dynamics

● 広瀬 良太* 大西 良孝* 市嶋 大路*

Ryouta HIROSE

Yoshitaka OHNISHI

Daiji ICHISHIMA



各モデルのFIRE適用前後の収束時間ステップ
Time step to convergence before and after applying FIRE for each model

我々はマルチスケールかつマルチフィジクスの現象に対してシミュレーション可能な、くりこみ群分子動力学 (Renormalized Molecular Dynamics RMD) 法を開発した。この方法によりマクロスケールの計算を可能とした。

しかし、この方法は有限要素法 (Finite Element Method FEM) に比べると単純な静解析に対しても計算時間がかかってしまう。

そこで、我々は高速構造緩和手法FIRE (Fast Inertial Relaxation Engine) を適用して、RMD法による静解析の計算効率を向上させた。本報では片持ち梁の曲げ、簡単な接触モデル、減速機のシミュレーションに適用した。そしてFIRE適用前の結果と比較して計算時間を短縮させることに成功した。

We have developed a renormalized molecular dynamics (RMD) method that simulates the multi-scale and multi-physics phenomenon. This method permits calculation on a macro scale. However, this method takes more computing time even for a simple static analysis compared to the finite element method (FEM). To eliminate this drawback, the fast structural relaxation technique, FIRE, was applied to the RMD method to improve the computational efficiency for the static analysis. This report discusses the application of the RMD method to the simulation of cantilever beam bending, simple contact model, and reduction gear system. The method has successfully reduced the computing time compared to the results of former trials.

1 まえがき

古典的な物理現象は原子や分子の多体問題として取り扱うことができる。原子や分子の運動を位相空間内で追跡し、統計平均を取ることで測定に対応した物理量を得ることができる。この手法を分子動力学 (Molecular Dynamics MD) 法⁽¹⁾⁽²⁾という。

MD法の大きな利点は、バルク完全結晶だけでなく、表面、界面、結晶欠陥、非晶質、液体、クラスターおよび微粒子などの材料について、原子レベルの構造とその時間変化を求めることができる点にある。また、熱の伝導といった動的な現象や、平衡状態から非常に離れた系の緩和や相転移なども計算できる。しかしながら、MD法は個々の粒子の運動方程式を数値積分することから、計算時間がかかり、工学的に意味の

ある巨視的なスケールの計算は実現不可能である。

そこで現在、MD法の計算効率を飛躍的に改善し、メゾスケールやさらには、マクロスケールまでもシームレスにシミュレーション可能な手法の開発が期待されている。計算効率を改善したMD法の例として、粗視化されたMD法⁽³⁾が開発されている。この手法はシームレスなシミュレーションが可能であるが、弾性体に限定されることからMD法の利点が失われている。また高分子系では構造単位を単一粒子とみなす粗視化MD法⁽⁴⁾が用いられているが、粗視化された粒子間に新たな相互作用をモデル化しなければならない。

そこで我々はくりこみ群⁽⁵⁾の考え方をMD法に適用することで、MD法の利点を継承したまま計算効率を飛躍的に向上させることができる、くりこみ群分子動力学法⁽⁶⁾⁽⁷⁾を開発した。

以前の報告⁽⁷⁾⁽⁸⁾において、固体の弾性変形、破壊および溶

融、流れ場と温度場の連成問題や高クヌーセン数非定常流れの巨視的なシミュレーションがRMD法により可能であることを示した。

しかし固体の弾性変形などの静解析を行う場合、有限要素法と比較すると計算時間がかなりかかってしまう。本報では、RMD法での固体の弾性変形などの静解析に対してさらなる計算効率の向上を目的として、高速構造緩和手法であるFIRE⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾を適用し、その効果を確認した。

2 くりこみ群分子動力学法

2.1 くりこみ群変換

現実の系が体積 $V=L^3$ 、原子数 N を持つとする。この系にくりこみ群を適用し、縮小された相似な系 (L', N') を作る。

$$\begin{aligned} L \rightarrow L' &= L \alpha^{-1} \\ N \rightarrow N' &= N \alpha^{-3} \dots\dots\dots (1) \\ \alpha &= 2^n \end{aligned}$$

n はくりこみ回数である。

くりこみに際し、物理量は次のようになりこまれる。

$$\begin{aligned} m \rightarrow m' &= m \alpha^2 \\ \phi \rightarrow \phi' &= \phi \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ここで、 m は質量、 ϕ は原子間ポテンシャルである。また、変数は次のようにスケールされる。

$$\begin{aligned} \mathbf{p} \rightarrow \mathbf{p}' &= \mathbf{p} \alpha \\ \mathbf{q} \rightarrow \mathbf{q}' &= \mathbf{q} \alpha^{-1} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここで、 $\mathbf{p}$ は運動量、 $\mathbf{q}$ は座標である。

くりこみの結果、時間はくりこみ変換によってスケールされない。しかし時間刻み Δt はくりこまれる前の系の α 倍に取ることが可能である。

2.2 場の量の算出

場の量は局所的な領域 $V_i \in V$ に含まれる原子数 $N_i \in N$ の統計平均により算出することができる。空間座標 $\mathbf{x}$ 、および時刻 t における速度場 $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$ 、密度分布 $\rho(\mathbf{x}, t)$ 、温度場 $T(\mathbf{x}, t)$ 、応力場 $\sigma_{xy}(\mathbf{x}, t)$ はそれぞれ以下の式で算出される。また、(2)、(3)式を用いて変換した相似則も同時に示す。

$$\mathbf{x}' = \frac{\sum_i^{N_i} m'_i \mathbf{q}'_i}{\sum_i^{N_i} m'_i} = \mathbf{x} \alpha^{-1} \dots\dots\dots (4)$$

$$\mathbf{v}'(\mathbf{x}', t) = \frac{\sum_i^{N_i} m'_i \dot{\mathbf{q}}'_i}{\sum_i^{N_i} m'_i} = \mathbf{v}(\mathbf{x}, t) \alpha^{-1} \dots\dots\dots (5)$$

$$\rho'(\mathbf{x}', t) = \frac{1}{V_i} \sum_i^{N_i} m'_i = \rho(\mathbf{x}, t) \alpha^2 \dots\dots\dots (6)$$

$$T'(\mathbf{x}', t) = \frac{2}{3N'_i k_B} \sum_i^{N'_i} \frac{1}{2} m'_i \left\{ \dot{\mathbf{q}}'_i - \mathbf{v}'(\mathbf{x}', t) \right\}^2 = T(\mathbf{x}, t) \dots\dots\dots (7)$$

$$\sigma'_{xy}(\mathbf{x}', t) = \frac{1}{V_i} \sum_i^{N_i} \left\{ m'_i \dot{q}'_{ix} \dot{q}'_{iy} - q'_{ix} \frac{\partial}{\partial q'_{iy}} \Phi(\mathbf{q}'_i) \right\} = \sigma_{xy}(\mathbf{x}, t) \dots\dots\dots (8)$$

特に応力・温度については、くりこみ変換に際して不変である。

3 FIRE

粒子法によって静解析を行うには、エネルギー的に安定な平衡位置を見つけ出すことが非常に重要な課題の一つである。これまで我々は運動方程式に減衰項を加えエネルギーを下げ、安定な平衡位置を求めていた。この手法でも平衡状態は得られるが、非常に時間がかかる。そこで我々はMD法において提案された高速構造緩和手法であるFIREを適用し計算効率を向上させた。

FIREは粒子にかかる力 $\mathbf{f}_i$ および粒子速度 $\mathbf{v}_i$ のみを入力として、繰り返し計算によるエネルギー最小化により粒子位置の緩和を実現する。以下にMD法におけるFIREのアルゴリズムを示す。

- F1. 粒子 i にかかる力 $\mathbf{f}_i$ および速度 $\mathbf{v}_i$ を計算する(MD法の計算)。
- F2. $\mathbf{P} = \mathbf{f} \cdot \mathbf{v}$ を計算する。
- F3. $\mathbf{v} \rightarrow (1 - \alpha) \mathbf{v} + \alpha \mathbf{f} / |\mathbf{f}| \times |\mathbf{v}|$ と更新する。
- F4. 過去の履歴において $P < 0$ となつてからの時間更新回数が $N_{\min}$ 以上かつ、 $P > 0$ のとき、時間刻みを $\Delta t \rightarrow \min(\Delta t \cdot f_{\text{inc}}, \Delta t_{\text{max}})$ と増加させ、さらに $\alpha \rightarrow \alpha f_\alpha$ と更新する。
- F5. $P \leq 0$ であれば、時間刻みを $\Delta t \rightarrow f_{\text{dec}} \Delta t$ と減少させ、系全体の粒子の速度を $\mathbf{v} \rightarrow 0$ とし、 $\alpha \rightarrow \alpha_{\text{start}}$ と再設定する。
- F6. F1(MD法の計算)に戻る。

各ステップにおいて $P \leq 0$ となった場合には系全体の運動エネルギーを0にする。安定に計算を行うためにF5において速度 $\mathbf{v}_i$ および時間刻み Δt を修正しながら反復ステップを進める。FIREに必要な $\mathbf{f}_i$ および $\mathbf{v}_i$ はRMD法においても既に求められているため、FIREのRMD法への適用は容易である。以下の計算においてFIRE実施のパラメータは $N_{\min}=5$ 、 $f_{\text{inc}}=1.1$ 、 $f_{\text{dec}}=0.5$ 、 $\alpha_{\text{start}}=0.1$ 、 $f_\alpha=0.99$ と設定した。

4 シミュレーションモデルと結果

RMD法へのFIRE適用後の計算効率向上の検証として3例の巨視的なサイズの弾性解析を実施した。まずは初歩的な片持ち梁の曲げの解析、次に簡単な接触を伴うモデル、最後に複雑な接触を伴うモデルとして減速機の静解析を実施した。それぞれの検証モデルでの計算効率向上の結果を代表図に示す。

4.1 片持ち梁への適用

既報⁽¹¹⁾で報告した片持ち梁の曲げ解析にFIREを適用した。既報では運動方程式に減衰項を導入することでエネルギーを下げ、平衡状態を求めた。結果は理論値⁽¹²⁾と1.9%の誤差であった。解析対象はfcc構造のアルミニウムとし、原子間ポテンシャルには以下に示すMorseポテンシャルを使用した。

$$\phi = \epsilon [\exp\{-2a(r-r_0)\} - 2\exp\{-a(r-r_0)\}] \dots\dots\dots (9)$$

$$a = 23.5 \times 10^9 (\text{m}^{-1}), \epsilon = 1.92 \times 10^{-20} (\text{J}), r_0 = 0.286 \times 10^{-9} (\text{m}) \dots\dots (10)$$

図1に示すように x 方向、 y 方向、 z 方向の長さをそれぞれ0.052(m)、0.052(m)、0.267(m)とし、梁の上端部に x 方向に3500(N)の力を加えた。23回のくりこみ操作により(スケー

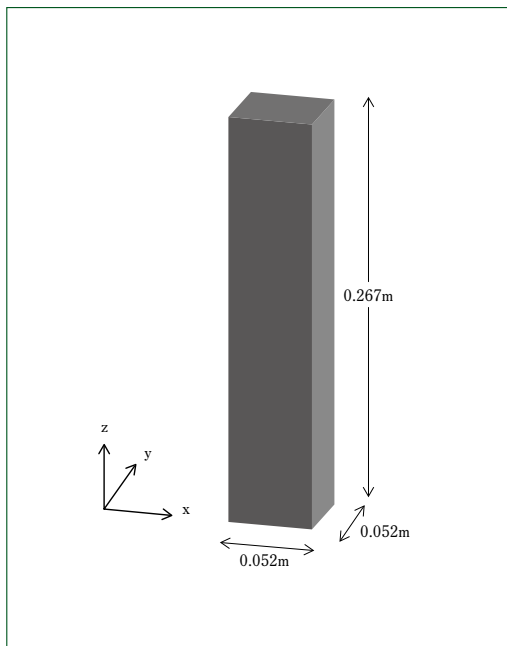


図1 片持ち梁の計算モデル
Calculation model of cantilever

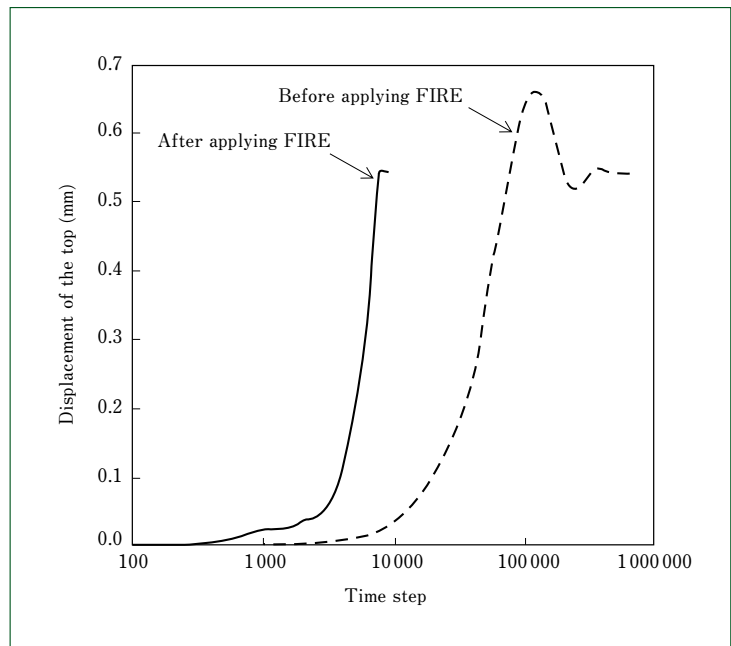


図2 片持ち梁の上端の変位
Displacement of top of cantilever

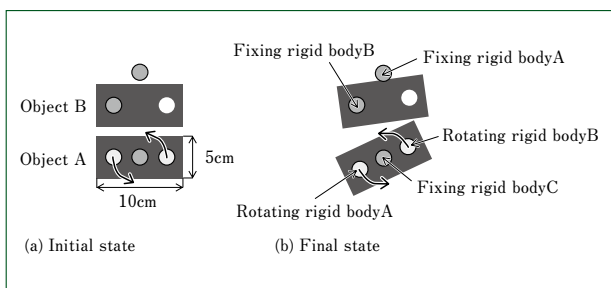


図3 単純な接触を伴う計算モデル
Calculation model with simple contact

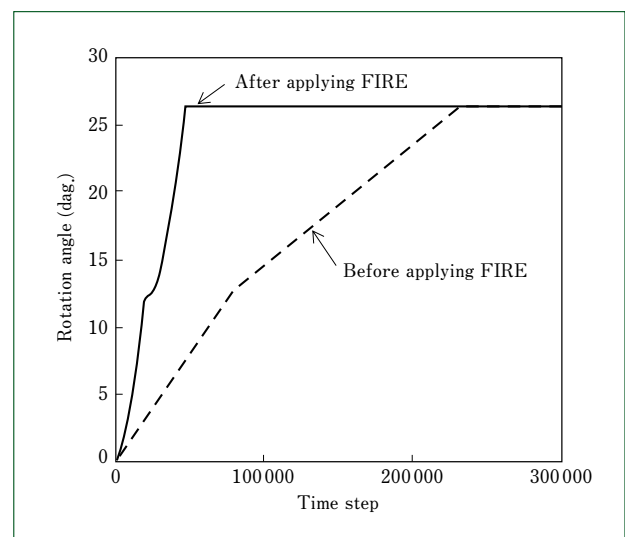


図4 剛体の回転角度
Angle of rotation of rigid body

ル因子 $\alpha=2^{23}$) くりこまれた原子数 N' を 81 920 個とし計算を実施した。

図2に梁の上端の変位と時間ステップの関係を示す。平衡状態の結果を得るのに必要な時間ステップは、FIRE適用前が600 000step程度であったのに対し、FIRE適用後は7 500step程度となり、計算時間を約1/80に短縮することができた。

4.2 単純な接触解析への適用

図3に、単純な接触を伴う計算モデルを示す。材料のヤング率は208.0(GPa)、密度は7 800(kg/m³)とした。また、原子間ポテンシャルは2次のポテンシャルとし、設定したヤング率となるようにパラメータを設定¹³⁾した。

図3(a)の初期状態から回転剛体A、Bを同じ角速度で回転させ、物体Aに回転運動を与える。物体Aは物体Bと接触し、物体Bは固定剛体Aと接触した状態で力が釣り合う。最終的に、モデルは図3(b)のようになる。

図4に、物体Aの回転角度と時間ステップの関係を示す。平衡状態を得るのに必要な時間ステップはFIRE適用前が250 000stepであったのに対して、FIRE適用後は50 000step程度と接触を伴うモデルに対しても計算時間を約1/5に短縮することができた。

4.3 減速機への適用

複雑な接触を伴う解析モデルとして減速機の静解析に適用した。図5に、本解析で用いた減速機の全体図を示す。このとき材料のヤング率は208.0(GPa)、密度は7 800(kg/m³)とした。原子間ポテンシャルは4.2と同じ方法で設定した。

減速機の物体Aにトルクを与え、回転運動をさせる。物体Bと物体Cは固定する。物体同士が複雑に接触した状態で力が釣り合い平衡状態となる。

図6に、系全体のエネルギーと時間ステップの関係を示す。FIREを適用した結果、FIRE適用前と比較して系全体のエネルギーが、早く安定な平衡状態になっていることが確認できる。平衡状態を得るのに必要な時間ステップはFIRE適用前が300 000stepであったのに対して、FIRE適用後は100 000step程度となり、計算時間を約1/3に短縮することができた。このような複雑な接触を伴うモデルに対しても十分

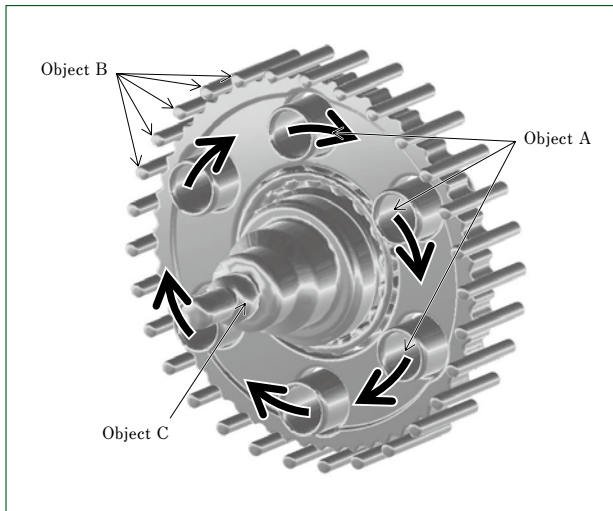


図5 減速機の計算モデル
Calculation model of reducer

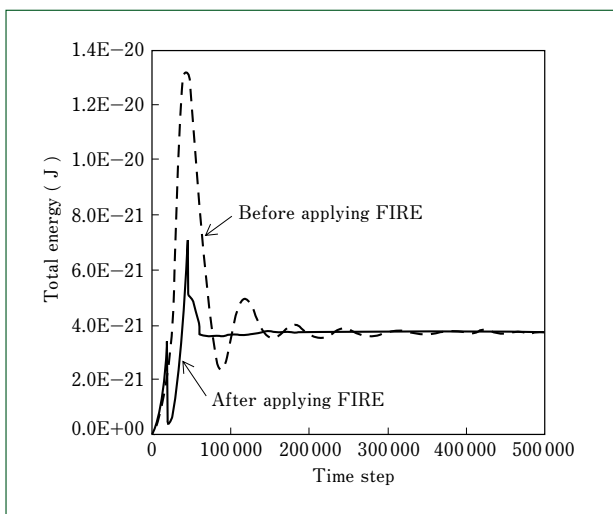


図6 全エネルギーの時間ステップ変化
Temporal change of total energy

な効果が得られることを示した。

5 むすび

- (1) RMD法を用いた静解析において高速構造緩和手法のFIREを適用した。
- (2) RMD法にFIREを適用したことにより、静解析において平衡状態の結果を得るのに必要な計算時間を飛躍的に短縮することができた。
- (3) 簡単な接触を伴うモデルはもちろんのこと、複雑な接触を伴う減速機の静解析においても、FIREの効果が十分得られることを示した。

(参考文献)

- (1) J.M.Thijssen. Computational Physics.Cambridge University Press,1999, p.175.
- (2) 日本機械学会編.原子・分子を用いる数値シミュレーション.コロナ社, 2001, p.11.
- (3) Robert E.Rudd, Jeremy Q.Broughton.Phys.Rev.B,vol.58,no10, 1998, p.5893.
- (4) Leonid V.Zhigilev,Prasad B.S.Kodali and Barbara J.Garrison, J.Phys.Chem.B,vol.101,1997,p.2028.
- (5) くりこみ理論の地平. 数理科学, no.406,1997.

- (6) 市嶋大路.シミュレーション方法及びプログラム. 特開2010-146368.
- (7) D.Ichishima,Y.Ohnishi,R.Hirose. Renormalization Group Theory for Molecular Dynamics. Sumitomo Heavy Industries Technical Review, no.168, 2008, p.31.
- (8) D.Ichishima,Y.Ohnishi,R.Hirose.Computer Experiments of Flow Fields by Renormalized Molecular Dynamics Method. Sumitomo Heavy Industries Technical Review, no.173, 2010, p.29.
- (9) Bitzek,E et al.Structural Relaxation Made Simple. Phys. Rev. Lett, 97,170201, 2006.
- (10) 戸田紘太郎,椎原良典,吉川暢宏.506樹脂の材料非線形挙動に対する粒子法の適用可能性.日本機械学会第23回計算力学講演会講演論文集, 2010, p.68.
- (11) 広瀬良太,市嶋大路,大西良孝.508くりこみ群分子動力学法による弾性解析,日本機械学会第23回計算力学講演会講演論文集,2010, p.72.
- (12) エリ・ランダウ,イエ・リフシッツ著,佐藤常三訳,弾性理論(ランダウ・リフシッツ理論物理学教程).東京図書,1983, p.144.
- (13) 市嶋大路,大西良孝.シミュレーション方法及びプログラム.特開 2009-037334.

気体検知式 LPG残量警報

LPG Fuel Optical Alarm for Forklift Truck



LPG残量警報装置は、LPGタンク内の燃料が残り少なくなると警報ブザーを鳴らし、オペレータにLPGタンクの交換時期を知らせる装置で、オプションとして設定されている。住友ナコ マテリアル ハンドリング株式会社では今回、従来から設定されている方式とは異なる新しい方式を採用し、現状の問題点の改善を行った。

内燃式フォークリフトでは、ガソリンよりも安価なLPGを燃料とするフォークリフト(LPG車)が普及している。LPG車の燃料補給は車両後部のカウンタウエイトの上に装備しているLPGタンクの交換により行われる。LPGタンク容量の制約により、通常6～9時間の稼働で交換が必要となり、交換頻度は高い。LPGタンクを交換するにはLPGタンク内の燃料を使い切る前に、車両が交換用のLPGタンク置場まで到達しておくことが望まれる。しかし、車両がLPGタンク置場に到達する前に燃料切れによって停止してしまうと、人力でLPGタンクを運搬しなければならない。また、作業場に車両が立ち往生することは他の作業に影響するとともに、危険が発生する。LPG残量警報装置は、これら不具合回避に有効な装置として活用されている。

従来のLPG残量警報装置はLPGタンク内に燃料による蒸気圧が発生していることを利用し、圧力スイッチを用いてLPG配管内の圧力を検知する方式を採用している。LPG配管内の圧力は温度やLPG燃料成分の違いにより変化する特性があることから、次の点でお客様から不満が寄せられている。

(1) 季節(外気温)により警報ブザーが鳴り始めてからの残

り走行可能距離(時間)が変化する。

(2) LPG燃料成分はお客様によって違いがあるため、警報ブザーが鳴り始めてからの残り走行距離(時間)が短すぎることがある。または、LPG燃料が満タン状態であるにもかかわらず警報ブザーが鳴ってしまうことがある。

圧力検知式では、お客様の使用環境に影響を受け易く、全ての条件で対応することは困難となっている。そこで、上記の問題を解決するために、気体検知式LPG残量警報装置を開発した。

特 長

- (1) LPGタンク内の燃料は液体であるが、使用により液体がなくなるとすべて気体となる特性を利用し、光学センサを用いてLPG配管内の燃料が液体から気体へ変化するのを検知する方式としている。
- (2) LPG配管内の燃料が気体へ変化した後の残り燃料の量は温度に対しての影響を受けにくく、安定している。警報ブザーが鳴り始めてからの残り走行可能距離が安定し、季節(外気温)による影響を受けない。
- (3) LPG配管内の燃料が気体へ変化した後の残り燃料の量はLPG燃料成分の違いにかかわらず、安定している。残り走行可能距離(時間)がお客様の使用するLPG燃料成分の違いによる影響を受けることなく、安定し、長くなっている。

(住友ナコ マテリアル ハンドリング株式会社 末廣飛翔)

住友重機械技報第176号発行に当たり

住友重機械技報第176号をお届け致します。

本誌は、当社が常々ご指導頂いている方々へ、最近の新製品、新技術をご紹介申し上げ、より一層のご理解とご協力を頂くよう編集したものです。

本誌の内容につきましては、さらに充実するよう努めたいと考えますが、なにとぞご批判賜りたく、今後ともよろしくご支援下さるよう、お願い申し上げます。

なお、貴組織名、ご担当部署などについては正確を期していますが、それらの変更がございましたら裏面の用紙にご記入の上、FAXでお知らせ頂きたいようお願い申し上げます。また、読後感や不備な点を簡単に裏面用紙にご記入願えれば幸いに存じます。

2011年8月

〒141-6025 東京都品川区大崎2丁目1番1号(ThinkPark Tower)

住友重機械工業株式会社

技術本部 技報編集事務局

(宛先)	(発信元)
住友重機械工業(株) 技術本部 技報編集事務局 行 FAX 横須賀 046 - 869 - 2355	貴組織名 担当部署 氏 名 TEL No. FAX No.

住友重機械技報第176号の送付先の確認と読後感などの件		
送 付 先 変 更	(旧送付先)	(新送付先)
	送付番号 _____	送付番号 _____
	組織名称 _____	組織名称 _____
	担当部署 _____ ➡	担当部署 _____
	所在地 _____ 〒 _____	所在地 _____ 〒 _____
新 規 送 付 先	新しい部署ができた場合ご記入下さい。	
	組織名称 _____	
	担当部署 _____	
	所在地 _____ 〒 _____	必要部数 _____ 部
本 号 の 読 後 感 に つ い て	1. 本号で、一番関心を持たれた記事は。	
	2. 本号を読まれたご感想をお知らせ下さい。(○印でご記入下さい。)	
	1 興味深かった 2 特に興味なし	
	その理由をお聞かせ下さい。	