



解説 博士論文 多軸制御工作機械送り駆動系の運動 制御に関する研究

佐藤, 隆太

(Citation)

精密工学会誌, 79(3):230-234

(Issue Date)

2013-03

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90001943>



1.はじめに

これまでの経緯をあらためて振り返ってみると、私のような若造が振り返るなどと申し上げるのはおこがましいが、人と人との縁により導かれてきたのだと強く感じる。現在縁あって大学での教職に就いているが、技術論文以外の文章を書く機会は大変貴重であり、これまでご指導、ご支援いただいた方々への感謝を込めて、また、この先の進路に不安を感じている学生諸氏、さらには自分自身へのエールを込めて、貴重な紙面をお借りしてこの一文をまとめることにしたい。

2.博士課程への進学に至った経緯

2.1 高専時代のこと

私が研究らしきものに初めて触れ、結構面白いかもしれない、と感じたのは、とある高専の研究室に配属されたときであった。小さいころから機械が好きだったこともあり高専の機械科に進学したが、半分は早く親元を離れて寮生活をしたいという不純な動機もあった。このため、学業面での成績は地を這うようなものだったと思う。

高専で配属された研究室では、PID コントローラの調整に関する研究テーマを与えられた。その研究室では「やりやあいいんだろ」「これで文句あっか」「それが人情だ」がモットーであり、当時の私にとっては無理難題を吹っかけられるのが常であった。結果をまとめてあって赤ペンで真っ赤に修正された。この当時の経験は貴重な財産となっている。最初の経験がその後の人生に大きな影響を及ぼすという意味で、鳥類と同じ刷り込み現象が人間にもあるように思う。

一方、その研究室では夕方近くになると「隆太、酒でも飲まなきゃやってらんないよな～」となり、教員室内で酒盛りが始まっていた（先生はすでにご退職されているし、10年以上経っているので時効であろう）。そして酒盛りの後で深夜まで研究に取り組んでいた。その研究室出身者でその後大学や社会で大いに活躍している諸先輩後輩は数え切れず、最近の世間の風潮として品行方正であろうとすることを意識しすぎるのも善し悪しなのではないだろうか。

このときの研究テーマは到底自分の手に負えるものではなく、その研究室の先輩で当時東京農工大学の博士後期課程在学中だった山崎敬則氏（現、小山高専）に面倒をみていただいた。これが後に博士後期課程へ進学するきっかけとなった。

2.2 大学学部時代のこと

高専卒業後は東北地方の大学に編入学した。幸いに編入

生は信用がなく（？）、基礎科目から履修させられたため、これまでの不勉強をなんとか取り戻すことができたと思う。この大学には第1希望で進学したわけではなかったが、非常に親切で質の高い講義が多かった。人間万事塞翁が馬、住めば都であり、例え進路や就職先が自分の思い通りにならなかつたとしても、悲観的になる必要は全くないと思う。

研究室では風力発電に関するテーマに取り組んだ。その研究室では私が1期生であり、気象台に出かけて風の観測記録等をいただき、周囲の研究室から必要なソフトウェアを借りるなどして卒業論文をまとめた。冬の寒さが大変厳しいところで、アパートの風呂釜を何度も破裂させてしまったが、厳冬期の山々の美しさは今でも深く心に残っている。

2.3 大学院博士前期課程のこと

学部卒業後は東京農工大学大学院博士前期課程に進学した。博士前期課程で大学を移ったきっかけは先に述べた高専時代の先輩の影響であり、堤正臣先生の研究室に所属することになった。ここから現在につながる数値制御工作機械送り駆動系のモデル化と制御に関する研究に取り組むことになった。

博士前期課程修了後はある石油会社に就職するつもりでいたところ、内定式も目前に控えた9月中旬ごろだったと思うが、研究に関する相談に伺った際に堤先生より博士後期課程への進学を勧められた。このときは即答できずに進学するべきかどうか迷ったが、そのときの研究を続ければ何かしらの成果をだせると思ったし、一度就職してしまうと現在の研究を続けることは難しいと考えた。また、博士後期課程修了後にも再び進路を選ぶことができると考え、博士後期課程への進学を決断した。

2.4 社会における博士の位置づけ

博士後期課程への進学に際しては、内定していた会社とも相談しなければならず、まずは博士後期課程への進学の意思と予定していた研究内容について説明した。そのときの課長（就職後は上司になるはずだった）は博士号を取得しており、博士号のもつ意味について深く理解されていた。説明後の会話のなかで問われたのは、学部生は専門作業、修士は問題解決能力、博士は問題発掘能力であり、私のやろうとしていることは修士課程の延長にすぎないのでないか、ということだった。それまで修士や博士のもつ意味について考えたことがなかったため、私は大きな衝撃を受けた。

それ以降、社会における博士の位置づけについて強く意識するようになった。博士後期課程を修了してしばらくた

った現在でも、果たして自分が真の問題発掘能力を有しているのか自問自答が続いている。その方からは、ご自身の博士後期課程でのエピソードとともに、「調心・調息」という言葉を送っていただいた。この言葉はいまでも心の片隅に常に常におかれている。

2.5 大学院博士後期課程のこと

博士後期課程への進学後もこれまでと余り変わらぬ生活が続いたが、毎年学部および修士の学生数名分の研究テーマを設定させていただいた。このとき堤先生より注意されたのは、10年先の目標を見据えてその実現に向けた研究テーマを設定するべきで、現在の研究の延長としての研究テーマを設定してはいけない、ということだった。堤先生は私の設定するテーマをみて冷や汗をかいていたのではないかと思うが、暖かく見守っていただいたことを感謝している。

博士後期課程へは1年間在籍しただけで退学し、助手として採用されることになった。その後1年間をおいて社会人学生として博士後期課程に再入学し、博士号を取得するという大変アクロバティックな経過をたどった。これは、博士後期課程在学者は教員になれないが、教員は博士後期課程に入学できる、という妙な規則のためであったが、その後そのようなことはなくなったと聞いている。この間、学内外の方々のご支援とご指導を受け、文字通り研究に没頭できることは大変幸運であった。この場をお借りして深く感謝申し上げたい。

3. 博士論文「多軸制御工作機械送り駆動系の運動制御に関する研究」の内容

当時、直進軸に加えて旋回軸を有する多軸制御工作機械が普及し始めていたが、その動的な運動精度および制御に関する研究例はみあたらなかった。そこでこの研究では、多軸制御工作機械の形状創成精度を向上するための送り駆動系の設計指針を確立することを目的として、送り駆動系の動的な挙動と、旋回軸を含む多軸同時制御運動時の同期精度に及ぼす動特性の影響とを検討し、同時に多軸制御運動時の同期精度を改善するための送り駆動系の制御系設計法を提案した。この研究のなかで、大きく分けて以下に示す4つのテーマに取り組んだ。

3.1 XYテーブル送り駆動系のモデル化

送り駆動系は数値制御工作機械における形状創成を支配する重要な構成要素であり、送り駆動系の運動軌跡はそのまま製品に転写されることから、その運動性能の向上が重要な課題である。送り駆動系は機械系、電気系、および制御系が融合したメカトロニクスシステムであり、その運動性能の向上のためにはシミュレーションによる検討が有効である。そこで、送り駆動系の挙動を的確に表現するための数学モデルを開発した。

モータトルクの飽和特性、機構の内部減衰、各摺動部における粘性および摩擦力を考慮した数学モデル（図1）と、各パラメータの決定方法について提案し、ステップ応

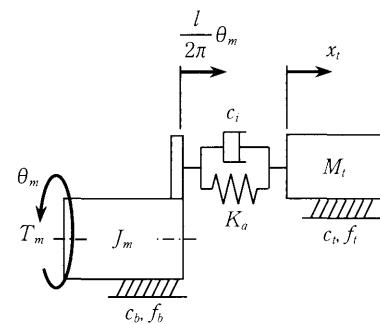


図1 送り駆動機構の振動モデル

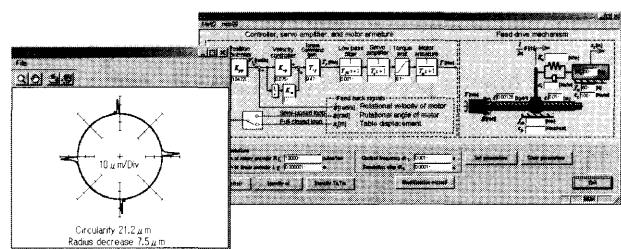


図2 送り駆動系シミュレータ

答、周波数応答、円運動およびコーナ部運動の実験とシミュレーションを行った結果、提案したモデルにより電気系と機械系の特性を総合的に解析することができ、さまざまな運動をひとつのモデルで正確にシミュレーションできることが確認された¹⁾²⁾。

この成果はその後の研究の基礎になったほか、この成果をもとにいくつかの共同研究を実施することができた。さらに、図2に示すような送り駆動系シミュレータを開発した³⁾。

3.2 円運動象限切替え時における送り駆動系の動的挙動

同時に2軸制御運動である円運動を行うと、各軸の運動方向が反転する象限切替え時に、図3に示すような突起状の軌跡誤差（象限突起）が生じる。象限突起の原因は軸受やボールねじ-ナット間、および直動案内部に存在する摩擦であり現象の解明と補正に関する多くの研究が行われてきたが、その現象が正しく理解されているとはいえない。

そこで本研究では、円運動時に生じる象限突起の生成過程を解明するために、サーボ加速度計を使用して円運動時の軸の加速度を測定し、非線形摩擦特性をモデル化して、運動方向反転時の挙動について実験とシミュレーションを行った（図4）。さらに、その結果に基づいて象限突起の生成過程を説明した⁴⁾。

この成果をもとに象限突起補正方法も開発され、円運動の半径や送り速度によらずに象限突起を補正することに成功した⁵⁾⁶⁾。さらに、この成果を発展させてさまざまな状況に対応した補正機能が開発された⁷⁾⁸⁾。

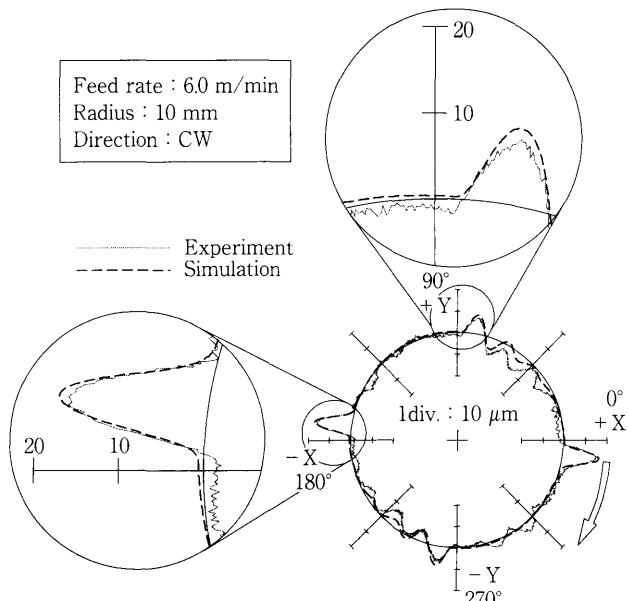


図3 円弧軌跡

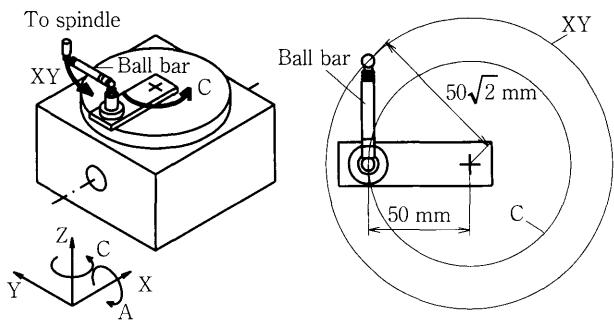


図5 同期精度の測定方法

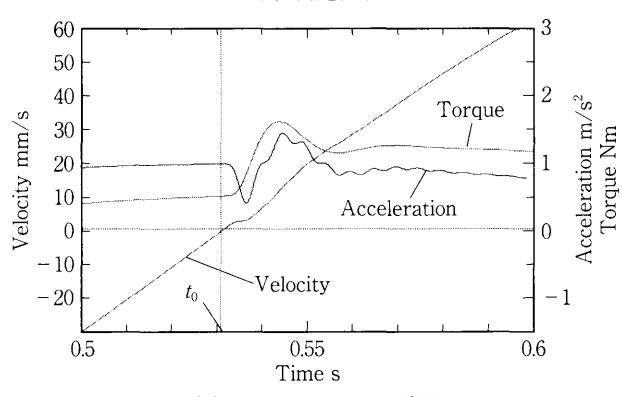
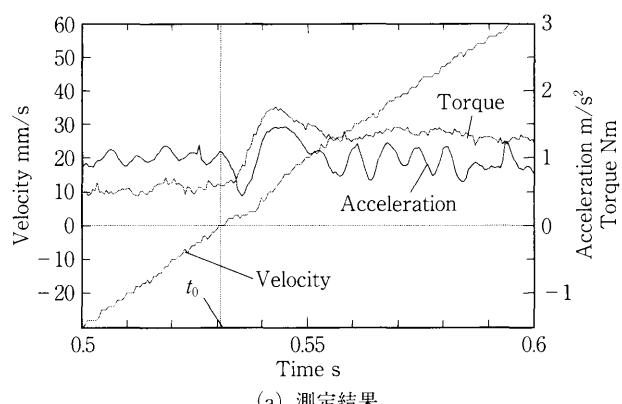


図4 運動方向反転時の速度と加速度

3.3 旋回軸を含む同時多軸制御運動

直進軸に加えて旋回軸を有する5軸制御マシニングセンタでタービンブレードやインペラのような複雑な形状を加工する際には、直進軸と旋回軸が同時に運動するため、直進軸と旋回軸の同期運動精度が加工精度に大きな影響を及ぼすと予測された。さらに、旋回軸を含む同時多軸制御運動では、工具-工作物間の相対速度を一定に保とうとするとき、各軸の速度は激しく変動するため、動的な同期精度がより重要なと考えられたが、直進軸と旋回軸の動的な同期精度に関する研究例はみあたらなかった。

そこで本研究では、直進軸と旋回軸の送り駆動系を動的なモデルで表現し、旋回軸を含む同時多軸制御運動のシミュレーションを行うことで、直進軸と旋回軸の動的な同期精度に影響を及ぼす因子を検討した。その結果、フィードフォワード制御を使うことで同時多軸制御運動時の同期精度を大幅に向上できること、旋回軸を含む同時多軸制御運動では、速度ループの特性が同期精度に大きな影響を及ぼし、同期精度の向上のためにはすべての軸の速度ループゲインを一致させる必要があることなどを明らかにすることができた⁹⁾（図5～7）。このとき構築した5軸制御マシニングセンタの数学モデルは、その後の研究でもさまざまな解

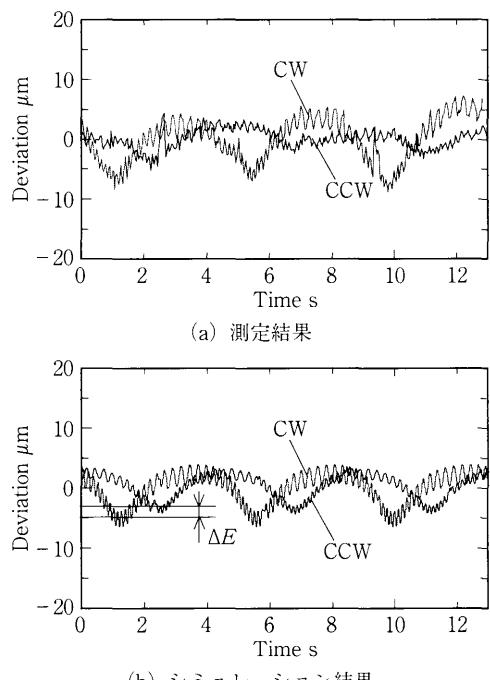


図6 同期精度の測定結果とシミュレーション結果

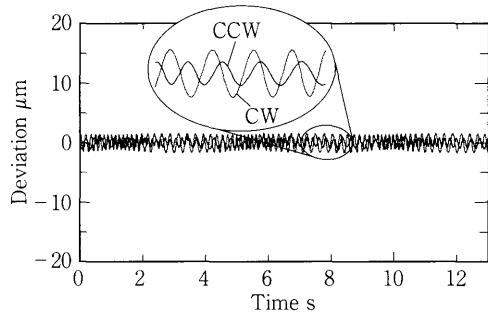
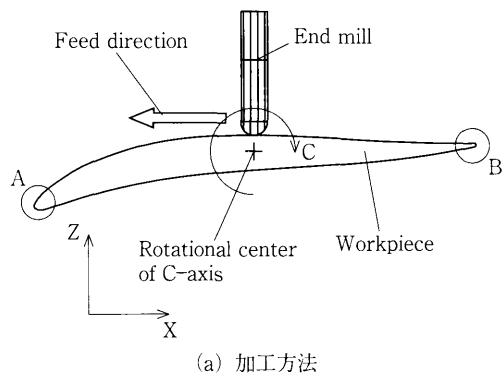


図7 同期精度の測定結果とシミュレーション結果（フィードフォワード制御+ゲイン調整）



(a) 加工方法

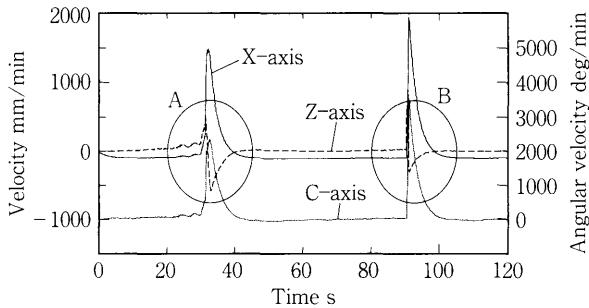


図8 翼形加工

析に用いられることとなった^{10)~13)}。

3.4 多軸同期制御精度向上のための制御系設計法

旋回軸を含む多軸同期制御精度を向上するためには、各軸の創特性を抑え、フィードフォワード制御により遅れを補償することが有効であることがわかった。そこで本研究では、多軸同期制御精度を向上するための制御系設計法として、部分的モデルマッチング法に基づいたサーボゲイン決定方法とフィードフォワード補償器とを提案し、その有効性について実験およびシミュレーションにより検証した^{14)~18)}。また、提案した手法を、旋回軸を含む5軸制御マシニングセンタのモデルに適用し、図8に示す翼形加工のシミュレーションを行うことで実際の同時多軸制御加工における効果を確認した。その結果、各軸の速度が急激に変化するため大きな同期誤差が生じやすい翼端部分において、同期精度を大幅に向上できることが明らかとなった（図9）。

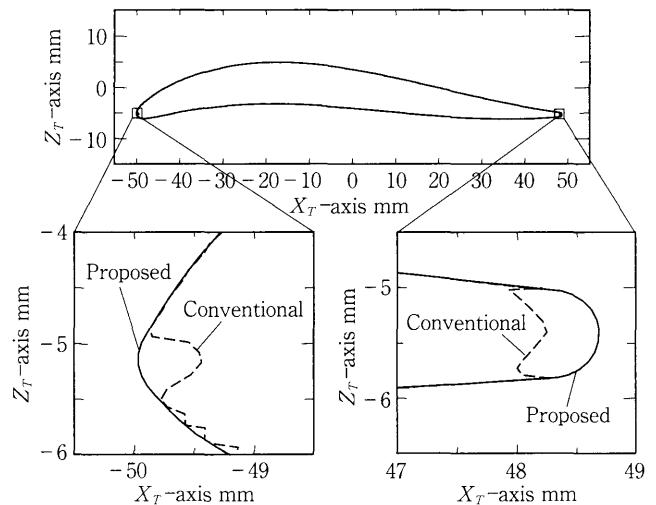


図9 翼形加工精度のシミュレーション結果

4. その後の経緯

博士後期課程修了後も継続して東京農工大学において助手および助教として勤務した。博士後期課程修了後の就職先として、これは大変に幸福なことであったと思う。しかし、もともとの自分の希望としては産業界で働きたかったこともあり、研究内容とも関連が深かった電機メーカーに転職した。ここでも数値制御工作機械の制御技術に関する研究開発に携わり、大変充実した2年半を過ごした後、縁あって現職である神戸大学に再転職した。

これらの自分の選択が正しかったのかどうか。答えは得られていない。正直、例えば博士課程に進学せずに就職していたらどうなっていたか、博士課程修了後に転職せずそのまま大学に残っていたらどうなっていたか、などと、思いをめぐらせることがある。しかし、実際正解というものは存在せず、どんな場合でも自分の選択が正しかったと思えるよう、おかれた環境で最善を尽くすしかないであろう。

5. 研究者を目指す皆様へ

もし現在博士後期課程への進学または入学に悩んでいて、少しでも研究というものに未練または興味を感じるならば、ぜひ博士後期課程への進学または入学をお勧めしたい。博士後期課程での経験は自分の能力を大きく高めてくれるし、博士後期課程で身につけるべき「問題発掘能力」こそ、これから日本の競争力の源泉となるものであろう。最近では大学ごとの博士後期課程学生へ支援制度も充実してきているし、やる気次第でさまざまな奨学金制度を利用できるはずである。

最後に、独立した研究者としてまさにスタートを切ったばかりの若輩者のこの拙文が、誰かを少しでも勇気づけ、将来への希望を感じさせることができたならば望外の喜びである。

参考文献

- 1) 佐藤隆太, 堤正臣: AC サーボモータと直動軸がり案内を用いた送り駆動系の数学モデル, 精密工学会誌, **71**, 5 (2005) 633-638.
- 2) R. Sato and M. Tsutsumi: Development of a Mathematical Model of Feed Drive System for NC Machine Tools, International Journal of Manufacturing Science and Technology, **6**, 1 (2005) 31-39.
- 3) R. Sato: Feed Drive Simulator, International Journal of Automation Technology, **5**, 6 (2011) 875-882.
- 4) 佐藤隆太, 堤正臣, 長島一男: 円運動象限切替え時における送り駆動系の動的挙動, 精密工学会誌, **72**, 2 (2006) 208-213.
- 5) 佐藤隆太, 寺島義道, 堤正臣: 微小変位領域の摩擦特性を考慮した象限突起補償器, 精密工学会誌, **74**, 6 (2008) 622-626.
- 6) 佐藤隆太, 寺島義道, 堤正臣: 摩擦補償方法, 摩擦補償器及びモータ制御装置, 特許第 4581096 号.
- 7) 梶口拓郎, 真鍋佳樹, 佐藤隆太, 堤正臣: NC 工作機械の運動精度向上に関する研究—トルク変化に対応する自律形態限突起補償器の開発—, 精密工学会誌, **76**, 5 (2010) 535-540.
- 8) 梶口拓郎, 国貞宏通, 国井嘉仁, 佐藤隆太, 堤正臣: マシニングセンタの円弧補間運動における二山象限突起の補正, 日本機械学会論文集 (C 編), **78**, 788 (2012) 1211-1219.
- 9) 佐藤隆太, 横堀祐也, 堤正臣: 5 軸制御マシニングセンタにおける直進軸と旋回軸の動的同期精度, 精密工学会誌, **72**, 1 (2006) 73-78.
- 10) 弓座大輔, 内海敬三, 堤正臣, 佐藤隆太: 5 軸制御マシニングセンタの同期運動精度測定方法, 日本機械学会論文集 (C 編), **72**, 723 (2006) 3672-3678.
- 11) M. Tsutsumi, D. Yumiza, K. Utsumi and R. Sato: Evaluation of Synchronous Motion in Five-axis Machining Centers with a Tilting Rotary Table, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, **1**, 1 (2007) 24-35.
- 12) 加藤教之, 堤正臣, 土橋祐, 佐藤隆太, 弓座大輔, 崔成日, 井原之敏: 円すい台加工を模擬した 5 軸制御マシニングセンタの 3 次元円弧補間運動軌跡の解析, 日本機械学会論文集 (C 編), **78**, 787 (2012) 964-975.
- 13) N. Kato, M. Tsutsumi and R. Sato: Analysis of Circular Trajectory Equivalent to Cone-frustum Milling in Five-axis Machining Centers Using Motion Simulator, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **64** (2013) 1-11.
- 14) 佐藤隆太, 井出裕, 堤正臣: 多軸同期制御精度向上のための送り駆動系の制御系設計方法, 日本機械学会論文集 (C 編), **73**, 727 (2007) 693-700.
- 15) 佐藤隆太, 井出裕, 堤正臣: サーボゲイン算出方法, サーボゲイン算出プログラム及びサーボゲイン算出装置, 特許第 4576530 号.
- 16) 佐藤隆太, 井出裕, 堤正臣: 位置制御装置, 特開 2007-72943.
- 17) 佐藤隆太, 在原広敏, 堤正臣: 多軸工作機械の送り駆動系用最適設計支援装置およびその装置用プログラム, 特開 2008-102714.
- 18) 佐藤隆太, 遠藤大介, 堤正臣: 同時多軸制御運動における旋回軸の高性能運動制御, 日本機械学会論文集 (C 編), **74**, 737 (2008) 60-67.