解 説

協働・自動化システムとキネマティクス

Cooperative and Robotized System and Expansion of Kinematics

武居 直行* 関口 叡 範* *首都大学東京

Naoyuki Takesue* and Masanori Sekiguchi* *Tokyo Metropolitan University

1. は じ め に

近年、労働人口の減少により、日本国内の様々な分野で人手不足が深刻な状況になっている。その解決手段の一つとして、ロボットの活用が期待されている。インフラ・橋梁の点検など、人に危険が及ぶ作業や今まで人手ではできなかった作業にドローンなどロボットを適用し、安全に効率よく省人化が実現されようとしている。ものづくりやサービスの分野でも人手の確保が難しいという話はよく耳にするが、今まで人手で行われてきたことをすぐにロボットに置き換えることができるなら、以前から置き換えられていただろう。それができなかったのには、技術的理由はもちろんのほか、経済的理由があったことも要因だと思われる。それらの理由が簡単に解消されるわけではないと思われるが、少なくとも確実にロボット導入は広がっている。ここで、それらを網羅的に語ることは難しい。本稿では、筆者のかかわった事例（協働・自動化）および現在の取り組み（キネマティクス）を紹介する。

2. 組立工程における協働・自動化

筆者がかかわった自動車組立ラインにおける人と協働するロボットの記事[1]を紹介する。この記事では、搭載をアシストする、自働で搭載する、自働で移載するロボットたちを紹介した。「搭載をアシストする」では、人とロボットのそれぞれの能力を活かすことで、人もしくはロボットだけでは難しい作業が実現され、従来の2人作業が1人作業に省人化された[2][3]。このウィンドウ搭載アシストロボットが実用化されたのは2007年のことである。「自働で搭載／移載する」では、低出力駆動と力センサレス柔軟（コンプライアンス）制御による安全対策を図り、自働化・省人化が実現された[3][4]。このスペアタイヤ搭載ロボットおよびウィンドウ移載ロボットが実用化されたのは、それぞれ2010年および2012~2013年である。今や世界的に協働ロボットのシェアを持っているUniversal RobotsやRethink Roboticsもこの時期からである。

自動車生産ラインの中にはプレス、溶接、塗装といった自

動化の進んだ工程もあるが、最終段階になる組立工程にはまだ多くの人手作業がある。その作業すべてを自動化することはもとより技術的に難しいが、コストを度外視して、高精度・高性能なセンサや多機能で制御性のよいアームと高速で高度なコンピュータ処理を用いれば、ひょっとしたら組立作業の自動化は実現できるかもしれない。しかし、自動車工場では、作業を自動化することに加え、生産変動・車種変更にもフレキシブルに再構成できることが要求される。また、当然ながらコストを度外視することはできず、トータル的に無駄のない効率的な（低コストで）運用ができなくてはならない。

World Robot Summit 2018 (WRS2018) の特集号[5]のものづくりカテゴリー[6]にも書かれているように、まさにAgility（迅速性、段取り替えの速さ）とLeanness（無駄のなさ）が実際の生産現場では重要となる。

3. World Robot Summit 2018

筆者の研究室の有志が前述のWRS2018のものづくりカテゴリーに出場した。初日のタスクボードでは奮闘したものの、残念ながら、その後は振るわなかった。それとは別の有志がWRS2018のサービスカテゴリー[7]のFuture Convenience Store Challenge・トイレ掃除タスクに出場した。カテゴリーは異なるが、目指すべく根幹は共通する。ロボットによる自動化である。

トイレ掃除タスクでは、上位3位までに入賞したチームはいずれもインフラタイプのものであった。つまり、製造現場でいうところの専用機である。これはトイレ掃除というタスクに特化した場合、認識し、計画し、動作するという方法よりも、環境を規定し、決まった動作を確実に再現する方法（いわゆるティーチング&プレイバック方式）の方が有利であるということにはほかならないと考えられる。

一方、筆者らの学生チームは自作のモバイルマニピュレータで挑戦したが、動作開始直後に、床面のゆがみにより経路がずれ、便器に接触して停止状態となってしまった。基本的にティーチング&プレイバック方式での動作であり、不測の事態を検知し、対処する能力がなかったため、リトライを宣言するほかなかった。

ティーチング&プレイバック方式は環境が安定・規定していれば有効であるが、未知環境や外乱があった場合に脆弱である。現在人が作業しているような不確定要素にあふれた“開かれた”環境[8]においても柔軟に動作できるロボッ

原稿受付 2019年9月27日

キーワード: Cooperative Robot, Robotization, Manipulation, Kinematics

*〒191-0065 日野市旭が丘6-6

*Hino-shi, Tokyo

トを実現することが望まれる。

4. 自在な動作の実現

Amazon ピッキングチャレンジや WRS のように実用性を目指したロボット競技会が近年多く行われている。従来のティーチング&プレイバック方式のロボットの動作だけではなく、画像処理・物体認識を踏まえての動作計画が必須となり、また物体を把持し、搬送や操作を行うためのマニピュレーションが重要である。

2013 年のマニピュレーション特集号 [9] の巻頭言には、「日本ロボット学会誌では、2002 年の 20 巻 2 号 [10] において (中略) その後約 10 年間、マニピュレーションを前面に出した特集号は組まれてこなかった。」と書かれている。それに比べると近年、製造業やマニピュレーションの特集が多く企画されている [9] [11]~[15] ことから関心の高さが伺える。

2018 年の特集号 [12] に書かれているように、マニピュレーションに関する研究は、ロボットの各分野の中でも恐らく最も古くからなされている分野の一つである。ここでは、筆者らが近年取り組んでいる運動学について紹介する。運動学 (キネマティクス) はマニピュレーションの中でも使われているロボット工学の基礎中の基礎であり、どちらかというマニピュレーションのように研究の現在進行形ではなく、すでに多くの教科書にまとめられた分野とも考えられる。しかし、様々な場面で、逆運動学の計算で奇妙な (危険な?) 動作が生成されるという話を聞く。これまで人が行ってきた作業を、専用機ではなくロボットで行わせようと考え、6 自由度もしくは人と同じ 7 自由度のマニピュレータを使う必要性が出てくる。さらには単腕ではなく、双腕や胴体を含む多自由度マニピュレータの場合もある。6 自由度以上では姿勢の取り扱いにも気を付けなくてはならない。このような多自由度のロボットマニピュレータにおいて、自在な動作を実現するためには、その作業目的を達成可能な指令関節変位群を生成する必要がある。その生成方法の種類は多岐にわたる。大抵の場合、教示の過程でロボットに与えられる要求は、手先効果器のタスク空間上で表されるため、それを関節空間上の対応する点に変換する計算である逆運動学が必要となる。

4.1 逆運動学の数値解法

一般に、関節変位から手先位置・姿勢を求める順運動学は比較的容易に行列計算等で導出できる。一方、手先位置・姿勢から関節変位を求める逆運動学は複数の解が存在し一意には求まらず、非可解である場合もあり、導出が難しいと言われる。その逆運動学の解法は、幾何学的考察または代数的式変形により解析解を得る方法と、反復計算を行うことで数値解を得る数値解法の二つに分けられ、実用化されている産業用ロボットのほとんどは逆運動学が解析的に解けるよう設計されている。一方、近年ではコンピュータの性能が向上し、数値解法で高速に解くことができる状況になった。

よく知られているように、 n 自由度の多関節ロボットに

図 1 Block diagrams of numerical solution of inverse kinematics in case with pseudo-inverse Jacobian

おける各関節の速度 $\dot{q}$ は、ヤコビ行列 $J(q)$ が行フルランクである場合に限り、次のように表される。

$$\dot{q} = J^+(q) v \quad (1)$$

ここで、 $J^+(q)$ はヤコビ行列の擬似逆行列、 $v \in \mathbb{R}^6$ は手先の速度である。上式を踏まえうえて逆運動学の数値解法を作成すると、図 1 のような数値解法を考案する人が多いのではないだろうか。

図 1 中の $q_k \in \mathbb{R}^n$ は反復回数 k 回目における各関節変位であり、 Δq_k はその 1 ステップ当たりの変化量である。また、 $K \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ は重み行列、 $e_k \in \mathbb{R}^6$ は目標の位置・姿勢 ${}^d x$ と手先の位置・姿勢 x_k との誤差を表す。関節変位の更新則は次のように表される。

$$q_{k+1} = q_k + J^+(q_k) K e_k \quad (2)$$

しかし、この方法には以下のような数多くの問題が存在する。

- (1) 各関節変位が連続的に変化したとき、姿勢の誤差を表す三つのパラメータも連続的に変化しなければならないことが暗に仮定されていること。
- (2) ヤコビ行列は常に行フルランクでなければならないこと。
- (3) 擬似逆行列の性質から、各ステップにおける各関節速度の二乗和は最小になるが、誤差 e_k の二乗和が最小になるとは限らないこと。
- (4) 関節変位の可動域制限が考慮されていないこと。また、関節変位に可動域制限を設けて数値解法を適用すると可動域制限によるデッドロックが発生するという新たな問題が生じること。

これまでに多くの数値解法が提案されてきたが、これらの問題に対する解決策の一部は杉原の解説記事で述べられている [16]。また、Sugihara の手法 [17] はほかの手法の中で唯一 100% の成功率で収束が示された実用的な手法である。

筆者らは、Arimoto らの仮想バネ仮説 [18] [19] (概念図は図 2 を参照) とコンプライアンス制御の一つであるダンピング制御 [20]~[22] に基づいて、逆運動学の数値解法を解釈し、杉原の手法の妥当性を説明できることを示した [23]。この手法では、関節変位の更新則は次のように表される。

$$q_{k+1} = q_k + D_k^{-1} J^T(q_k) K e_k \quad (3)$$

D_k は、 $D_k - 1/2 J_k^T K J_k$ が正定値行列となり、 D_k が正則となるような行列である。ブロック線図では図 3 に示すようになる。計算過程で D_k の逆行列の計算は行うものの、

図2 Conceptual diagram of virtual spring hypothesis

図3 Block diagrams of numerical solution of inverse kinematics in case with transpose of Jacobian

正則な行列であり、計算破綻（ゼロ除算）を危惧する必要はない。筆者らの論文[23]では、仮想バネによるポテンシャルエネルギーをリアプノフ関数とし、その減少性に基づいた反復計算の終了条件を含め、可解な問題および非可解な問題のどちらにおいても、より速い収束を実現している。

4.2 拡張角軸ベクトル

逆運動学の数値解法で用いる誤差ベクトルを求めるためには、回転行列によって表される回転を三つの変数によって表現する必要がある。三つの変数を用いた姿勢の表現方法としては、modified Rodrigues parameters や conformal rotation vector, オイラー角などが知られている。上記三つの方法の中で、最もよく用いられるのはオイラー角であるが、不連続点を生じさせる場合がある。そこで、角軸ベクトルを用いる方法が提案されている[17][24]。角軸ベクトルは最終的に三つの変数によって表されることや、回転行列からの変換が、特異点を除き一意に定まるという点が四元数と異なる。ただし、角軸ベクトルには特異点の問題[25]と逆三角関数の値域による制約[26]という二つの問題が残されていた。そこで筆者らは、特異点を含めた角軸ベクトルの計算法と拡張角軸ベクトルという新たな姿勢誤差の表現方法を提案した[27]。

図4に、角軸ベクトルと拡張角軸ベクトルをそれぞれ用いたときの逆運動学解の例を示す。従来の角軸ベクトルでは逆三角関数の値域の制約から、 180° を超える姿勢の誤差を表現することができない。そのため、図4左図の例ではリンクどうしが干渉する向きの回転を避けることができない。一方、図4右図の拡張角軸ベクトルを用いた例では、 180° を超える姿勢を表現でき、最終的には手先効果器は同じ姿勢を取りながらも干渉を回避する解を得ることができる。

人で例えて言うなら、背中の痒い場所に手を伸ばす際、胸を突っ切って手を運ぶわけにはいかず、肩の上から、もしくは脇の下から手をまわすと言えるだろう。

図4 The paths of the end effector when solving inverse kinematics using angle-axis vector (left) and extended angle-axis vector (right)

図5 Example of two targets for redundant manipulator

4.3 優先度付き多点目標を有する逆運動学

前述したように、逆運動学はタスク空間上の点を関節空間上の対応する点に変換する計算であるが、タスク空間に与えられる点の数は一つとは限らない。例えば、人と同じ7自由度マニピュレータにおいて、その冗長性を活用してリンクと障害物との干渉回避を行う場合においては、手先とリンクのそれぞれに目標が与えられるため目標が二つとなる。また、腰に自由度を有する双腕型のロボットにおいても、右腕と左腕の手先にそれぞれ目標が与えられるため目標が二つになる。さらに、カメラを搭載した頭部にも目標を与えると三つになることも考えられる。

このように冗長性をサブタスクに応用することを目的とした関連研究では、式(1)に零空間への直交射影行列を追加した次式がよく用いられる。

$$\dot{q} = J^\dagger(q)v + (I_n - J^\dagger(q)J(q))r \quad (4)$$

ここで、 $I_n \in \mathbb{R}^{n \times n}$ は単位行列であり、 $r \in \mathbb{R}^n$ は任意ベクトルである。 r の定め方によって冗長自由度をサブタスクに応用できるようになる。例えば、Ito らは関節変位の可動域制限を考慮することが可能となる手法を提案している[28]。また、花房、Nakamura らは優先度付き逆運動学[29][30]を提案している。

零空間への直交射影行列を用いることの問題点としては、計算が複雑になることやヤコビ行列が行フルランクでない場合、計算破綻が起こることが挙げられる。

一方で、零空間への射影行列を求めることなく優先度付き逆運動学を解くことができる方法としては、Sugihara [31] や関口 [32] の方法が挙げられる。しかし、収束の速さが可解性に依存することや、拘束条件との誤差の厳密な最小化の両立などにまだ課題が残っている。

5. お わ り に

本稿では、筆者のかかわった事例（協働・自動システム）および現在の取り組みの一部（キネマティクス）について紹介した。特に4章に述べた取り組みは、さらに発展すべく、関節変位の可動域制限を考慮した逆運動学解法 [33] や、優先度付き逆運動学の一般化を試みている。これらはロボットマニピュレータを自在に操るうえで重要な基盤技術になる。ひいては、痒い所に手が届く、人の作業をロボットで自動化する一助になれば幸いである。

参 考 文 献

- [1] 武居直行, 牧野力也, 藤原弘俊: “人と協働する自動車組立ロボット”, ロボット (日本ロボット工業会機関誌), no.219, pp.1-4, 2014.
- [2] 村山英之, 武居直行, 松本邦保, 鴻巣仁司, 藤本英雄: “自動車組立ラインのウィンドウ搭載支援ロボット”, 日本ロボット学会誌, vol.28, no.5, pp.624-630, 2010.
- [3] 武居直行: 日本機械学会編・先端事例から学ぶ機械工学 (増訂版), 第8編「工場で人と協働する組立ロボット」, pp.127-142, 丸善出版, 2013.
- [4] 村山英之, 藤原弘俊, 中野陽雄, 石居賢治, 武居直行, 森田寿郎, 法林祐一, 藤本英雄: “80W モータによる 25kg 可搬省エネロボットの実用化”, 第28回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 3J1-1, 2010.
- [5] [特集] World Robot Summit 2018, 日本ロボット学会誌, vol.37, no.3, 2019.
- [6] 横小路ほか: “World Robot Summit 2018 ものづくりカテゴリー競技「製品組立チャレンジ」の概要”, 日本ロボット学会誌, vol.37, no.3, pp.208-217, 2019.
- [7] 岡田ほか: “World Robot Summit サービスカテゴリーは何を競ったのか”, 日本ロボット学会誌, vol.37, no.3, pp.218-223, 2019.
- [8] 下田真吾: “開かれた知能—その意義と研究専門委員会の役割—”, 日本ロボット学会誌, vol.36, no.9, pp.580-581, 2018.
- [9] [特集] マニピュレーション研究の最前線, 日本ロボット学会誌, vol.31, no.4, 2013.
- [10] [特集] マニピュレーション: 21世紀に向けた新展開, 日本ロボット学会誌, vol.20, no.2, 2002.
- [11] [特集] 食品マニピュレーションのためのロボット技術, 日本ロボット学会誌, vol.37, no.6, 2019.
- [12] [特集] マニピュレーション・レビュー, 日本ロボット学会誌, vol.36, no.5, 2018.
- [13] K. Harada, M.A. Roa and A. Yamaguchi: “Special issue on advanced manipulation,” Advanced Robotics, vol.32, no.19-20, p.1029, 2017.
- [14] [特集] マニピュレーションの最新動向, 日本ロボット学会誌, vol.35, no.1, 2017.
- [15] [特集] 製造業向けロボット, 日本ロボット学会誌, vol.33, no.5, 2015.
- [16] 杉原知道: “逆運動学の数値解法”, 日本ロボット学会誌, vol.34, no.3, pp.167-173, 2016.
- [17] T. Sugihara: “Solvability-unconcerned Inverse Kinematics by Levenberg-Marquardt Method,” IEEE Transaction on Robotics, vol.27, no.5, pp.984-991, 2011.
- [18] S. Arimoto, M. Sekimoto, H. Hashiguchi and R. Ozawa: “Natural resolution of ill-posedness of inverse kinematics for redundant robots: A challenge to Bernstein’s degrees-of-freedom problem,” Advanced Rob., vol.19, no.4, pp.401-434, 2005.
- [19] S. Arimoto, M. Sekimoto and R. Ozawa: “A challenge to Bernstein’s degrees-of-freedom problem in both cases of human and robotic multi-joint movements,” IEICE Trans. on Fund. of Elec., Comm., and Comp. Sci., vol.E88-A, no.10, pp.2484-2495, 2005.
- [20] 小菅一弘: “力制御法の分類と制御システムの設計法”, 日本ロボット学会誌, vol.9, no.6, pp.751-758, 1991.
- [21] D.E. Whitney: “Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control,” Int. J. of Robotics Research, vol.6, no.1, pp.3-14, 1987.
- [22] D.E. Whitney: “Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions,” Trans. of ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, pp.91-97, 1977.
- [23] 関口叡範, 武居直行: “仮想バネの弾性エネルギー最小化に基づいた特異姿勢・非可解な問題に対して安定な逆運動学の数値解法”, 日本ロボット学会誌, vol.36, no.9, pp.645-653, 2018.
- [24] R. Campa and H. de la Torre: “Pose Control of Robot Manipulators Using Different Orientation Representations: A Comparative Review,” American Control Conference, pp.2855-2860, 2009.
- [25] F. Caccavale, B. Siciliano and L. Villani: “THE ROLE OF EULER PARAMETERS IN ROBOT CONTROL,” Asian Journal of Control, vol.1, no.1, pp.25-34, 1999.
- [26] S. Ghosh and D. Roy: “A frame-invariant scheme for the geometrically exact beam using rotation vector parametrization,” Computational Mechanics, vol.44, no.1, pp.103-118, 2009.
- [27] 関口叡範, 武居直行: “特異点における角軸ベクトルの計算法と拡張角軸ベクトルの提案”, 日本ロボット学会誌, vol.37, no.8, pp.726-734, 2019.
- [28] M. Ito, K. Kawatsu and M. Shibata: “Kinematic Control of Redundant Manipulators for Admitting Joint Range of Motion Maximally,” IEEE Journal of Industry Applications, vol.6, no.4, pp.278-285, 2017.
- [29] 花房秀郎, 吉川恒夫, 中村仁彦: “関節形ロボットアームの冗長性の解析とその優先順位を有する作業への応用”, 計測自動制御学会論文集, vol.19, no.5, pp.421-426, 1983.
- [30] Y. Nakamura, H. Hanafusa and T. Yoshikawa: “Task-Priority Based Redundancy Control of Robot Manipulators,” The International Journal of Robotics Research, vol.6, no.2, pp.3-15, 1987.
- [31] T. Sugihara: “Robust Solution of Prioritized Inverse Kinematics Based on Hestenes-Powell Multiplier Method,” Proc. of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.510-515, 2014.
- [32] 関口叡範, 武居直行: “切断法による優先度付き逆運動学の数値解法”, 日本ロボット学会誌, vol.37, no.8, pp.711-717, 2019.
- [33] 関口叡範, 武居直行: “拡張角軸ベクトルによる関節変位の可動域を考慮した逆運動学の数値解法”, 第37回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 3E3-07, 2019.

武居直行 (Naoyuki Takesue)

2000年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。2000年大阪大学助手。2003年名古屋工業大学寄附講座講師。その後、准教授を経て、2008年首都大学東京准教授。博士(工学)。ロボットの運動制御、ロボット機構の開発、ロボットによる自動化などの研究に従事。

2004年日本ロボット学会研究奨励賞, 2011年日本ロボット学会論文賞, 2017年 Advanced Robotics Best Paper Award 受賞。日本機械学会, 計測自動制御学会, 電気学会, 精密工学会, IEEE の会員。
(日本ロボット学会正会員)

関口叡範 (Masanori Sekiguchi)

2017年首都大学東京システムデザイン学部を早期卒業。同年首都大学東京大学院システムデザイン研究科に入学。現在に至る。冗長多関節ロボットの運動計画や回転の表現などに関する研究に従事。

(日本ロボット学会学生会員)