

日本学士院賞 受賞者 中村 仁彦



略歴	生年	専攻学科学目
昭和五二年	九月	ロボット工学
昭和五七年	三月	京都大学工学部精密機械工学科卒業
同 五七年	三月	京都大学大学院工学研究科博士課程単位取得退学
同 五七年	四月	京都大学工学部助手
同 六〇年	九月	工学博士（京都大学）
同 六二年	九月	米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校機械環境工学科助教
平成二年	九月	米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校機械環境工学科准教授
同 三年	四月	東京大学工学部助教
同 九年	二月	東京大学工学部教授
同 一三年	四月	東京大学大学院情報理工学系研究科教授
令和二年	四月	東京大学名誉教授
同 二年	四月	東京大学大学院工学系研究科特任研究員
同 二年	五月	東京大学大学院工学系研究科人工物工学研究センター上席研究員
同 三年	二月	(株) KINESCOPIC 代表取締役（現在に至る）
同 五年	五月	東京大学大学院総合文化研究科特任研究員
同 六年	三月	アラブ首長国連邦・ムハンマド・ビン・ザーイード人工知能大学ロボティクス学科長・教授（現在に至る）

工学博士中村仁彦氏の「人型ロボットの運動の計算と制御に関する基礎研究」に対する授賞審査要旨

一つの物体はその三次元の位置の座標 XYZ と姿勢の角度 $\alpha\beta\gamma$ の六変数で表される自由度を持つ。工場で部品をつかんで移動させる仕事で利用される基本的な工業用ロボットはそれが可能なように、必要不可欠なちようど六個の自由度を持つように作られた。しかし、近年、更に汎用的で器用な動きが求められるロボットはもっと多くの自由度——冗長自由度——を持っている。人型ロボットはその代表で、四〇を超える自由度を正確に目的に合って連動させることが求められる大規模複雑システムである。中村仁彦氏はそのような大冗長自由度を持つロボットの運動の計算と制御の理論的な基盤を作り、それらの人の運動への応用展開に貢献した。

1. 多自由度システムの運動制御の基礎的理論と計算法の開発

人型ロボットでは、脚の自由度は主に移動するための歩行や全身の立位の安定化に使われるが、手の動きの生成にも関わる。逆に、

腕の自由度は主に手の動きを生成するが、腰と連動して歩行の安定化の役割をも担うこともある。これらの役割は目的・状況により、かつ同時に並行して変化する。人型ロボットの制御においては、このような運動を最終的に各自由度の運動に帰着させることが必要であるが、その計算の基盤になっているのが中村氏の業績である「作業優先度 (Task Priority) に基づく冗長度制御」という概念である (1)。多くの求められる役割を与えられた条件の下で調停し、大規模な拘束条件付き最適化問題として解くことで制御の解を得る (13) (15)。人型ロボットの運動制御ではこのような最適化問題を毎秒数百回から千回程度の速さで計算する。

作業優先度 (Task Priority) に基づく冗長度制御の計算では、求められる役割を果たす自由度とそれ以外の冗長自由度とよばれる自由度を、全自由度の空間で数学的に分解する (1) (2)。また、求められる役割が数多くある場合に自由度が足りなくなり特異点問題が現れるが、この場合にも計算が不安定になって破綻しないよう、特異点の近くになると自動的に近似解に移行する解法が使われる (3)。これらは全て中村氏の初期の研究業績である。

冗長自由度の制御問題は、自由度の配分だけでなく、力の配分制御にも現われる。例えば、複数の指の間で物体を把握する場合に、指の力をどう分配するべきかという問題 (4)、さらに、両足で立

ちながら片手を壁に接触して支えたり（力が閉ループを作り、問題が難しい）、片手で物体を持ち上げたりする場合（29）である。中村氏は、このような冗長自由度のある力分配問題を、動力学計算を用いた拘束条件付き最適化問題として解く方法を示した。そのためには、モータがある力を出すときにその結果として現れる動きを計算する順動力学計算（11）と、目的の動きを作るためにモータが出すべき力を計算する逆動力学計算（10）を効率的に実行する必要があるが、多自由度システムの効率的動力学計算法——特に計算量が大きい順動力学計算のための並列計算法——を開発した。これらの研究成果を基礎として、人型ロボットの歩行時の床から受ける反力や手と物体や環境との接触力を繊細に制御する運動制御へと人型ロボットの研究分野が深化してきた。

2. 人間の運動のバイオメカニクスモデルと人間とロボットのコミュニケーションへの展開

中村氏はロボットの動力学計算の効率化の技術をさらに多くの自由度を持つ人間の運動の計算に応用することに取り組んだ。人間の骨格の各骨に対応する各身体部位に質量をもたせ、張力を発生するワイヤーで筋肉を近似した全身の計算モデルを開発した（16）。これによって、三次元の全身の空間運動を再現し全身の筋肉が発生す

る張力を推定する画期的なバイオメカニクスの計算分野を開拓した（17）（18）（19）。この技術は、企業化されてオリンピック選手を含む多くの運動選手の運動技能の解析に利用され、さらに運動トレーニング、運動による外傷の予防、リハビリテーションの効果の評価などに研究・応用が広がっている。

人型ロボットは人間の職場や生活の空間で様々な役割を分担するようになると予想される。その時には人間とのコミュニケーションが不可欠である。ロボットが人型であることの重要性がそこにある。中村氏は、人類学のミメシス理論を人間と人間だけではなく、人間とロボットのコミュニケーションを成立させる原理になると考えた（21）。人間の三次元の運動の再構成をロボットが人を見る目の機能として利用する。運動を小さな運動の単位である分節に分解し、分節を分類して各分節の統計的パラメータから運動記号を作った（23）。運動記号は運動の認識、運動の生成の双方向に利用することができ（22）（24）。さらに、運動記号と言語記号を連想ネットワークで結び、言語から運動、運動から言語を想起する実験を行った（28）。これらは、現在のAI大規模言語モデルや生成AIの次の目標であるエンボディメント、すなわち言語が身体性を持つことに向かう先駆的研究である。

- (1) Y. Nakamura, H. Hanafusa and T. Yoshikawa, "Task Priority Based Redundancy Control of Robot Manipulators," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 6, No. 2, pp. 3-15, 1987.
- (2) Y. Nakamura and H. Hanafusa, "Optimal Redundancy Control of Robot Manipulators," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 6, No. 1, pp. 32-42, 1987.
- (3) Y. Nakamura and H. Hanafusa, "Inverse Kinematic Solutions with Singularity Robustness for Robot Manipulator Control," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 108, No. 3, pp. 163-171, 1986.
- (4) Y. Nakamura, K. Nagai and T. Yoshikawa, "Dynamics and Stability in Coordination of Multiple Robotic Mechanisms," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 8, No. 2, pp. 44-61, 1989.
- (5) Y. Nakamura and M. Ghodoussi, "Dynamics Computation of Closed Link Robot Mechanisms with Non-Redundant and Redundant Actuators," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 5, No. 3, pp. 294-302, 1989.
- (6) Y. Nakamura and R. Mukherjee, "Nonholonomic Path Planning of Space Robots via Bi-Directional Approach," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 4, pp. 500-514, 1991.
- (7) G. Oriolo and Y. Nakamura, "Free-Joint Manipulators: Motion Control under Second-Order Nonholonomic Constraints," *Proceedings of 1991 IEEE/RSI International Workshop on Intelligent Robots and Systems* (Osaka, Japan, November, 1991), IEEE, pp. 1248-1253, 1991.
- (8) Y. Nakamura, W. Chung and O. J. Sordalen, "Design and Control of the Nonholonomic Manipulator," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 1, pp. 48-59, 2001.
- (9) Y. Nakamura and A. Sekiguchi, "The Chaotic Mobile Robot," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 6, pp. 898-904, 2001.
- (10) Y. Nakamura and K. Yamane, "Dynamics Computation of Structure-Varying Kinematic Chains and Its Application to Human Figures," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 16, No. 2, pp. 124-134, 2000.
- (11) K. Yamane and Y. Nakamura, "Comparative Study on Serial and Parallel Forward Dynamics Algorithms for Kinematic Chains," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 28, No. 5, pp. 622-629, 2009.
- (12) Y. Nakamura, H. Hirukawa, K. Yamane, S. Kajita, K. Fujiwara, F. Kanehiro, F. Nagashima, Y. Murase and M. Inaba, "Humanoid Robot Simulator for the METI HRP Project," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 37, Nos. 2-3, pp. 101-114, 2001.
- (13) T. Sugihara and Y. Nakamura, "Boundary Condition Relaxation Method for Stepwise Pedipulation Planning of Biped Robots," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 25, No. 3, pp. 658-669, 2009.
- (14) H. Kaminaga, T. Ko, R. Masumura, M. Komagata, S. Sato, S. Yorita and Y. Nakamura, "Mechanism and Control of Whole-Body Electro-Hydrostatic Actuator Driven Humanoid Robot Hydra," *Proceedings of 2016 International Symposium on Experimental Robotics* (Oct. 3-6, 2016, Tokyo, Japan), Springer, Cham, pp. 656-665, 2017.
- (15) T. Ko, K. Yamamoto, K. Murotani and Y. Nakamura, "Compliant Biped Locomotion of Hydra, an Electro-Hydraulically Driven Humanoid," *Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots* (Beijing, China, November 6-9, 2018), IEEE, pp. 587-592, 2018.
- (16) Y. Nakamura, K. Yamane, Y. Fujita and I. Suzuki, "Somatosensory Computation for Man-Machine Interface from Motion Capture Data and Musculoskeletal Human Model," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, No. 1, pp. 58-66, 2005.
- (17) A. Murai, K. Yamane and Y. Nakamura, "Acquiring a Human Somatic Reflex Model Using a Neuromusculoskeletal System," *The 10th International Con-*

- ference on the Simulation of Adaptive Behavior, Osaka, Japan, 2008.
- (18) K. Hirasawa, K. Ayusawa and Y. Nakamura, "Muscle Activity Estimation Based on Inverse Dynamics and Muscle Stress Analysis by Finite Element Method," *Romansy 19 – Robot Design, Dynamics and Control (Proceedings of CISM-IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics, and Control (Paris, France, 2012))*, Springer, Vienna, pp. 333–340, 2013.
- (19) K. Ayusawa, G. Venture and Y. Nakamura, "Identifiability and Identification of Inertial Parameters Using the Underactuated Base-Link Dynamics for Legged Multibody Systems," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 33, No. 3, pp. 446–468, 2014.
- (20) T. Ohashi, Y. Ikegami, K. Yamamoto, W. Takano and Y. Nakamura, "Video Motion Capture from the Part Confidence Maps of Multi-Camera Images by Spatiotemporal Filtering Using the Human Skeletal Model," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (Madrid, Spain, October 1–5, 2018), *IEEE*, pp. 4226–4231, 2018.
- (21) T. Inamura, I. Toshima, H. Tanie and Y. Nakamura, "Embodied Symbol Emergence Based on Mimesis Theory," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 23, No. 4/5, pp. 363–378, 2004.
- (22) Y. Nakamura, W. Takano and K. Yamane, "Mimetic Communication Theory for Humanoid Robots Interacting with Humans," *Robotics Research (Post-conference Proceedings of the 12th International Symposium of Robotics Research (San Francisco, USA, October 12–15, 2005))*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 128–139, 2007.
- (23) D. Kulić, W. Takano and Y. Nakamura, "Incremental Learning, Clustering and Hierarchy Formation of Whole Body Motion Patterns Using Adaptive Hidden Markov Chains," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 27, No. 7, pp. 761–784, 2008.
- (24) W. Takano, K. Yamane, T. Sugihara, K. Yamamoto and Y. Nakamura, "Theory of Communication between Human and Humanoid Robot based on Embodied Symbol Model," *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 28, No. 6, pp. 735–745, 2010.
- (25) W. Takano, H. Imagawa and Y. Nakamura, "Spatio-Temporal Structure of Human Motion Primitives and its Application to Motion Prediction," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 75, Part B, pp. 2288–2296, 2016.
- (26) W. Takano, Y. Yamada and Y. Nakamura, "Generation of Action Description from Classification of Motion and Object," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 91, pp. 247–257, 2017.
- (27) W. Takano, H. Kanayama, T. Takahashi, T. Moridaira and Y. Nakamura, "A Data-Driven Approach to Probabilistic Impedance Control for Humanoid Robots," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 124, Article No. 103353, 2020.
- (28) W. Takano and Y. Nakamura, "Statistical Mutual Conversion between Whole Body Motion Primitives and Linguistic Sentences for Human Motions," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 34, pp. 1314–1328, 2015.
- (29) S. Caron, Quang-Cuong Pham and Y. Nakamura, "ZMP Support Areas for Multicontact Mobility under Frictional Constraints," *IEEE Transactions on Robotics* Vol. 33, No. 1, pp. 67–80, 2017.