

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 13 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2008～2012

課題番号：20220001

研究課題名（和文） 身体運動と言語を統一した人間・機械コミュニケーションの成立

研究課題名（英文） Establishing Human-Machine Communication through Kinesiology and Linguistic Integration

研究代表者

中村 仁彦 (NAKAMURA YOSHIHIKO)

東京大学・大学院情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：20159073

### 研究成果の概要（和文）：

人間の身体と運動の記号モデルと自然言語モデルを接続することによって、世界や他者の理解を行い、それに基づいて自己の行動を決定する計算システムを構築した。人類の祖先がたどったものとは異なる経路をたどって、まだきわめて限られてはいるが、われわれが世界や他者を理解するのと類似の方法をロボットが獲得した瞬間である。これを再帰的に行うことによって、他者の行動決定のモデルを推論する自己のモデルを推論するなど、いわゆる「こころの問題」に接近することができる。この過程で、人間の深部身体感覚や神経活動の推論の計算基盤を構築し、これらをヒューマノイドロボットへ実装するために、力に敏感なアクチュエータと駆動系、外乱の機敏に反応して随時にステップを変更する歩行制御系を開発した。

### 研究成果の概要（英文）：

Connecting the symbol system of kinesiology, namely body and motions, of a human with the natural language system, we constructed a computation system that understands the world and the others, and determines the own motion based on the understanding. Though it followed a different pathway that the ancestors of humans had taken many years ago, a robot system now can share a very limited but similar way we understand the world and the others. On the course of this research, we established a computational foundation to estimate somatosensory sensation and neural activities of humans in motion. Force sensitive actuators and transmission systems and control systems to make flash response to disturbances are also developed for humanoid robots that communicate with the humans.

### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	38,200,000	11,460,000	49,660,000
2009年度	37,000,000	11,100,000	48,100,000
2010年度	28,600,000	8,580,000	37,180,000
2011年度	27,000,000	8,100,000	35,100,000
2012年度	25,400,000	7,620,000	33,020,000
総計	156,200,000	46,860,000	203,060,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：知能ロボット、統計推論、自然言語処理、脳型情報処理、身体感覚

### 1. 研究開始当初の背景

平成 10 年頃にはヒューマノイドロボットの歩行制御が関心を集めていた。研究代表者は平成 10-15 年の JST CREST のプロジェクトに

おいてヒューマノイドのセンサリ・モータ・マップに非線形力学系を用いた情報処理系を導入し知能の力学モデルの研究を行った。平成 15-19 年度の科研費 基盤研究(S)で「知

能の力学的情報処理モデルの展開」の研究を実施し、ミラーニューロンの数学モデルの確立とその多重階層構造によって記号獲得と抽象化を行った。また、ヒューマノイドロボットと詳細人体の筋・骨格モデルを用いた大規模センサリ・モータ系のシミュレーション技術を確立した。

これらを通じて人間と機械の身体感覚をもつコミュニケーションのための情報学へと展開するべき段階に来ているとの認識を持つにいたった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、人間の身体と行動の記号モデルと、自然言語モデルを接続することによって、人間とロボットをめぐる以下の問題に計算論の観点から取り組むことである。

- (A) 機械知能の根本問題を解明する。
- (B) ロボットの知能化の基盤技術を与える。
- (C) 人間に関する高度情報処理をもつマン・マシーン・インタフェイスの原理を解明する。
- (D) 脳科学の「こころ」の問題へ身体と言語からの構成論的研究法を与える。

## 3. 研究の方法

### (1) 身体運動コーパスの構築

- 1.1 人間の日常的運動の計測データを文節化、記号化、構造化する方法・環境の構築
- 1.2 人間の生活やスポーツなどの日常的運動を計測した大規模データベースを構築
- 1.3 人間の日常的運動のデータベースをもとに身体運動形態素データベースを構築
- 1.4 身体運動形態素の連鎖として表現される日常的運動を集積した身体運動コーパスを構築

### (2) 人間の深部身体感覚の推定とその構造化

- 2.1 人間の日常的運動の計測から筋活動計算までを自動的に行う計測環境の構築
- 2.2 人間の日常的運動に関わる運動神経、感覚神経の神経活動の推定法の構築
- 2.3 人間の日常的運動の筋活動、神経活動の構造化、低次元化法の開発
- 2.4 人間の日常的運動の情報を含む身体運動データベースの構築

### (3) 自己とモノ、自己と他者の間の関係性コーパスの構築

- 3.1 自己とモノの関係性を記憶・連想する情報処理の開発
- 3.2 自己と他者の関係性を記憶・連想する情報処理の開発
- 3.3 自己=モノ関係性コーパスの構築
- 3.4 自己=他者関係性コーパスの構築
- 3.5 身体運動コーパスとモノ関係性コーパスの融合による道具使用モデルの構築
- 3.6 身体運動コーパスと他者関係性コーパスの融合による身体対話モデルの構築

### (4) 自然言語の情報処理と身体運動の情報処理の融合

- 4.1 自然言語と身体運動を融合する統計的情報処理基盤技術の開発
- 4.2 自然言語コーパスと身体運動コーパスの統合
- 4.3 身体運動を統計的尤度の高い自然言語へ変換する運動記述システムの開発
- 4.4 自然言語を統計的尤度の高い身体運動へ変換する運動想起システムの開発

### (5) 自然言語と身体感覚でコミュニケーションするヒューマノイドの開発

- 5.1 コミュニケーション研究用のヒューマノイドロボットの開発
- 5.2 自然言語と身体運動の統計的情報処理のためのクラスタ計算サーバの開発
- 5.3 自然言語と身体運動を用いて人間と対話するロボットの実現
- 5.4 自然言語と身体運動を用いた自己理解・他者理解から「こころの理論」への展開

## 4. 研究成果

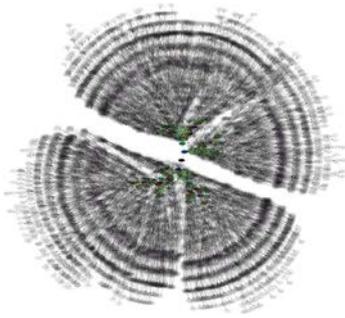
研究成果は以下の5つの項目に分類される。

### 4-1 身体運動コーパスの構築

全身運動パターンを統計モデルによって学習・記号化・記憶するヒューマノイドロボットの知能の枠組みを提案した。運動記号によって、ロボットは人間の行動を記憶のある運動の記号と照らし合わせ、理解することができる。また、記憶した運動記号から身体運動を生成することによって、環境に対して身体を通じて働きかけることができる。これは身体運動を記号表現として記憶し、行動理解・生成へ再利用するヒューマノイドロボットの知能である。

人間と生活空間を共有するヒューマノイドロボットには、膨大な人間の身体運動を観察、記憶し、行動理解・生成への効率的な再利用技術が求められる。本研究では、大規模な身体運動の記憶を、記号を通じて構造化する運動データベースを構築した。運動データベースは、身体運動の類似度に基づいた運動の階層構造化とその時系列関係からの因果律抽出を基盤とする。運動の記号間の距離を統計的尺度である Kullback Leibler 情報量として求め、距離構造から Ward 法によって二分岐階層構造を構築する。日常の行動を運動記号の時系列として表現し、記号をノード、記号間の遷移をエッジとした統計的グラフィカルモデルによって学習することによって、運動の因果律を抽出する。統計的グラフィカルモデル上において、現在の運動から確率の高い未来の運動記号列を探索問題として解くことによって、ヒューマノイドロボットは人間の行動を予測することが可能となる。朝7時に起きて、顔を洗い、新聞を読み、食事を終わると外出するあなたを毎日見て

いるヒューマノイドロボットが、あなたが朝起きる姿を見るとその先を予測して、新聞を用意し、食事を出してくれるようになる未来への第一歩となる。身体運動データベースを、動きを映像として投影した画像シルエット特徴量や筋張力データを含むように拡張し、単眼カメラから3次元身体運動を復元する技術や力情報を含まない身体運動から筋張力など力学情報を推定する技術が確立されつつある。

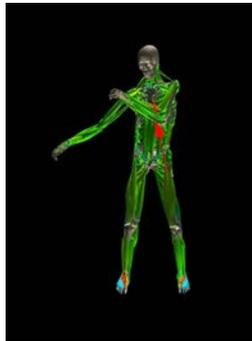


#### 4-2 人間の深部身体感覚の推定とその構造化

##### 【身体感覚の数理モデル】

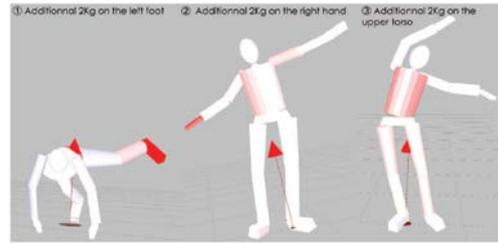
人間と共存するヒューマノイドを創り出すには、人間の深部身体感覚の推定技術は必要不可欠である。解剖学的な知見に基づき人間の筋骨格モデル及び神経筋ネットワークモデルを構築し、運動・動力学計算プラットフォームをもとに、人間の深部身体感覚である筋張力を推定するシステムを開発した。

人間の末梢神経系を表す数理モデルを解剖学に基づいて構築し、人間の運動データを用いてパラメータを同定することで、人間の体性反射を模擬するニューラルネットワークを構築した。協同筋のグルーピングやEMG・生理学的筋モデルを用い、筋張力推定の計算アルゴリズムを改良することで1秒間に16フレームの筋張力推定と可視化を行ない、スポーツやリハビリテーションにおけるバイオフィードバックを可能にした。



##### 【力学パラメータの同定】

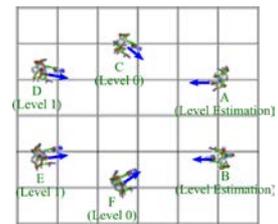
ヒューマノイドロボットや人などの脚移動システム全般に対して、質量・重心・慣性テンソルなどの力学パラメータを同定する技術を開発した。ヒューマノイドが周囲の環境や人間と接触しながらタスクを行うといった高性能な運動能力を実現する上で、精度の高い動力学モデルに基づく運動制御は極めて重要となる。また人の運動解析において、各個人ごとの特徴や差異を精度良く求める上で、個人の人体力学モデルの簡易的かつ非侵襲な計測技術は有用である。



脚移動システムのリンク機構を木構造で表現した場合、ベースリンクの運動方程式のみから、全身の力学パラメータが可同定であることを証明した。これに基づき、ベースリンクの同定式を利用して、関節トルクを一切計測せずに、関節角度とシステムに働く外力の計測のみから、全身のパラメータを同定する手法を開発した。同定されたパラメータが、例えば質量が正などといった、物理的整合性を必ず満たす手法も開発した。本手法では凸多面体理論を利用して、剛体を有限の質点集合で表現することで、計算量を大幅に低減した。この計算効率を利用し、人の力学パラメータをリアルタイムで同定して、同定結果を視覚的に表示するシステムを開発した。

#### 4-3 自己とモノ、自己と他者の間の関係性コーパスの構築

他者の行動や意図を推測・理解し、行動を制御しようとする社会性は知能の根源である。物や事の理解や抽象的思考は、行動を理解する機能を



基に築かれていく。人間の身体運動を統計モデルによって記号として記憶し、他者の行動を記憶した記号と照らし合わせてその行動を理解し、記号から運動を生成する知能を構築してきた。この枠組みを拡張し、自己の運動と他者の運動を統計モデルに学習して記号化する方法論、自己と他者の関係性の記号を用いて他者の行動を再帰的に深読みする計算論を確立した。自己の運動の結果として生まれてくる他者の運動が推測できる。同一の記号を再帰的に処理することによって他者の行動を深読みして、それに応じて自己の行動を決定することが可能となった。他者の推論を読み解くことは、他者の行動を決定するシステムを知ること、すなわち「こころ」を理解することにつながる。今後、「こころの理論」への展開が期待される。

#### 4-4 自然言語の情報処理と身体運動の情報処理の融合

記号とは、指し示すものと指し示されるものが結び付いたシステムである。結び付きは記号が使われる社会・文化に特有で恣意的で

ある。恣意性が記号の利便性を高め、言語へと昇華させた。人間は言語によって世界を表現し、推論を行い、他者とのコミュニケーションを行う。ヒューマノイドロボットの知能の目的は、言語を縦横に使う情報処理を構築することと言っても過言ではない。

本研究では身体運動をノードとエッジで構成されるグラフィカルな統計モデルによって記号化する。同様に統計モデルは自然言語処理においても使われる。われわれは身体運動の記号と自然言語処理を数学的整合性によって結ぶことで、人類の言語獲得の歴史を一跨ぎにする戦略を取った。



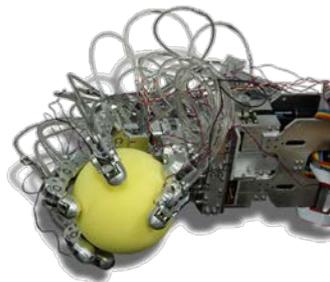
運動記号と単語の間の連想構造を表現する運動言語モデルと文章の構造を表現する自然言語モデルを統合し、運動知覚と文章表現の間を双方向に行き来する情報処理システムを開発した。ヒューマノイドロボットが運動を観察すると運動言語モデルを用いて単語を連想し、自然言語モデルを用いて並べ替えることによって文章を作成する。これはロボットが運動を言語で解釈するための計算である。文章から自然言語モデルを用いて単語を抽出して、その単語から運動言語モデルを通じて運動記号を連想する。これはロボットが言語から身体運動を連想するための計算である。文章間の連想モデルも構築し、運動間の連想、運動と言語の連想、言語間の連想といった多様な連想計算に基礎を確立した。将来はヒューマノイドロボットが読書によって、疑似体験するようになるだろう。

#### 4-5 自然言語と身体運動感覚でコミュニケーションするヒューマノイドの開発

##### 【知覚に優れた身体の開発】

本研究ではバックドライブバビリティに優れたEHA (Electro-Hydrostatic Actuator : 電気静油圧アクチュエータ) を開発した。

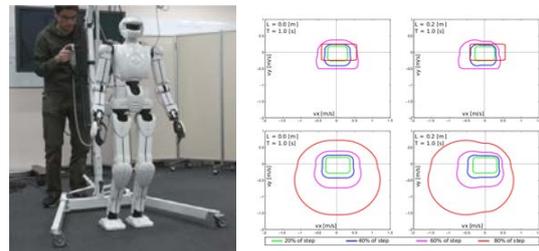
EHA は油圧アクチュエータの一種であるが、制御弁を用いずにポンプの制御により油圧を変化させる。油圧回路が歯車減速機と伝達



系を置き換えていると考えることができる。機械摩擦が少なく、バックドライブバビリティを飛躍的に改善できる可能性があり、高いエネルギー効率が見込まれる。耐衝撃性や圧力計測によるトルク推定など、油圧駆動の特色も備えている。

##### 【ニュートラルポイントによる随時ステップング法の開発】

ヒューマノイドロボットのための随時的なパターン生成技術を開発した。従来の研究では、境界値問題を解決するためにモデル予測制御理論や境界緩和法を用いている。しかし計算の複雑さのために、外乱への即応性が課題であった。外乱への即応性は脚型システムの主要機能である。



本研究では限られた入力のもとに物理的整合性のある状態の遷移を実現するという観点からこの問題に取り組んだ。各ステップでの最適解の計算において脚の近似線形化モデルを採用した。任意の歩行に実現可能なステップを得ることが可能となった。解が解析的に得られるため、離散化を必要とせず、制御の計算は高速であることが特長である。提案した運動生成・制御をヒューマノイドロボット HRP-4 に実装し外乱に機敏に反応し、随時にステップを変更する柔軟な歩行が可能であることを確認した。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 17 件) (査読有)

1. K. Ayusawa, G. Venture, Y. Nakamura, Identifiability and Identification of Inertial Parameters Using the Under-actuated Base-Link Dynamics for Legged Multibody Systems, Intern. J. of Robotics Research (accepted).
2. 高野涉, 鮎澤光, 濱野聖也, 梅澤慶介, 中村仁彦, “身体運動と言語を結ぶロボットの統計的情報処理”, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.7, pp.12-21, 2012.
3. 高野涉, 上段達弘, 中村仁彦, “運動の認識・生成計算の再帰的情報処理を通じた群集をすり抜けるヒューマノイドロボット”, 情報処理学会論文誌, Vol.53, No.11, pp.2466-2476, 2012.
4. 神永拓, 田中宏和, 甘利友也, 丹羽大和, 中村仁彦, 感度関数増大によるアシスト制御を行

- う静油圧駆動膝用パワーアシストの開発, 日本ロボット学会誌, No. 29, 609-618, 2011.
5. 高野渉, 今川洋尚, クリッチ・ダナ, 中村仁彦, クリスタルボール 運動の記号推論を通じた未来の行動予測, 日本ロボット学会誌, No. 29, 745-751, 2011.
  6. 高野渉, 山根克, 杉原知道, 山本江, 中村仁彦, 身体的記号化モデルに基づく人間とヒューマノイドロボットのコミュニケーション理論, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.6, 2010, 735-745,
  7. 高野渉, 山根克, 中村仁彦, 運動記号と運動レベルの連想モデルに基づく運動データの検索・生成計算, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.6, 723-734, 2010.
  8. 鮎澤光, ベンチャー・ジェンチャン, 中村仁彦, ベースリンクの非駆動性を利用した浮遊リンク系の力学同定法 - 跳躍する人間・脚型ロボットの力センサレス力学同定 -, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.8, 1004-1013, 2010.
  9. A. Murai, K. Kurosaki, K. Yamane, Y. Nakamura, Musculoskeletal-see-through mirror: Computational Modeling and Algorithm for Whole-Body Muscle Activity Visualization in Real Time, Progress in Biophysics and Molecular Biology, Vol.103, 310-317, 2010.
  10. T. Sugihara and Y. Nakamura, Boundary Condition Relaxation Method for Stepwise Pedipulation Planning of Biped Robots, IEEE Trans. on Robotics, Vol. 25, No. 3, 658-669, 2009.
  11. D. Kulic, W. Takano, Y. Nakamura, On-line Segmentation and Clustering from Continuous Observation of Whole Body Motions, IEEE Trans. on Robotics, Vol.25, No.5, 1158-1166, 2009.
  12. G. Venture, K. Yamane, Y. Nakamura, and T. Yamamoto, Identification of Human Limb Viscoelasticity using Robotics Methods to Support the Diagnosis of Neuromuscular Diseases, Intern. J. of Robotics Research, Vol.28, No.10, 1322-1333, 2009.
  13. 稲邑哲也, 谷江博昭, 中村仁彦, 幾何学的シンボル操作による多様な動作パターンの認識・生成を実現する原始シンボル空間の構成法, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.5, 84-94, 2009.
  14. 高野渉, 中村仁彦, 統計的相関に基づく動作パターンのリアルタイム教師なし分節化と原始シンボルの自律的獲得, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.9, 1046-1057, 2009.
  15. 鮎澤光, ベンチャー ジェンチャン, 中村仁彦, ベースリンクの運動方程式を利用した脚型ロボットの最小力学パラメータの同定, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.9, 1066-1077, 2009.
  16. D. Kulic, W. Takano and Y. Nakamura, Incremental Learning, Clustering and Hierarchy Formation of Whole Body Motion Patterns using Adaptive Hidden Markov Chains, Intern. J. of Robotics Research, Vol.27, 761-784, 2008.
- 〔国際会議〕 (計 78 件) (査読有)
1. Q.-C. Pham, Y. Nakamura, Affine trajectory deformation for redundant manipulators. Robotics: Science and Systems, ID166, 2012. Sydney, Australia. (BEST PAPER AWARD)
  2. D. Lee, C. Ott, Y. Nakamura, Mimetic Communication with Impedance Control for Physical Human-Robot, Interaction, IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, pp.1535- 1542, May 2009. Anchorage, USA. (KUKA Service Robotics Best Paper Award Finalist)
  3. C. Ott and Y. Nakamura, Employing wave variables for coordinated control of robots with distributed control architecture, IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, pp. 575-582, 2008. Pasadena, USA. (BEST CONFERENCE PAPER FINALIST)
- 〔国内学会発表〕 (計 102 件)
1. 神永拓, 安藤雄太, 大月智史, 小田中浩平, 中村仁彦, 出力軸トルクセンサを用いたバックドライバブル静油圧アクチュエータの力感応制御, 第 18 回ロボティクスシンポジウム, pp.28-34, 2013/03/14-15, 山形県上山市. (査読有) (BEST PAPER AWARD)
  2. 鮎澤光, 中村仁彦, “勾配計算分解を用いた逆運動学計算の高速化および大自由度筋骨格モデルへの応用”, 第 17 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.148-155, 2012. 山口県山口市. (査読有) (BEST PAPER AWARD, ロボティクスシンポジウム研究奨励賞, 計測自動制御学会 SI 部門研究奨励賞)
  3. 高野渉, 中村仁彦, “身体運動と言語を繋ぐ統計的情報処理を用いたヒューマノイドロボットの運動の言語理解と言語からの運動生成計算,” 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2011/10.26-28, 静岡県熱海市 (査読有) (論文賞)
  4. 高野渉, 今川洋尚, クーリッチ・ダナ, 中村仁彦, クリスタルボール: 運動の記号推論を通じた未来の行動予測, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会, 112-4 (査読なし), 2010/09/22-24, 愛知県名古屋市 (査読無) (高野渉: 日本ロボット学会若手研究奨励賞)
  5. 村井昭彦, 黒崎浩介, 山根克, 中村仁彦, EMG, 筋の動特性モデルに基づく筋張力のリアルタイム推定及び可視化, ロボティクスシンポジウム, 2009/03/ 16-17, 北海道・登別市 (BEST PAPER FINALIST, 計測自動制御学会 SI 部門

## 研究奨励賞)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計5件)

名称:筋張力データベースの構築方法、筋張力データベース、筋張力データベースを用いた筋張力計算方法及び装置

発明者:中村仁彦,村井昭彦,高屋定裕,山根克

権利者:東京大学

種類:特許

番号:2008192924

出願年月日:2008/7/27

国内外の別:国内・国外

名称:運動データベース構造、および当該運動データベース構造のための運動データ正規化方法、並びに当該運動データベース構造を用いた検索装置及び方法

発明者:中村仁彦,山根克,山口能

権利者:東京大学

種類:特許

番号:2008139020

出願年月日:2008/5/28

国内外の別:国内・国外

名称:力学パラメータの同定法

発明者:中村仁彦, VENTURE Gentiane, 鮎澤光

権利者:東京大学

種類:特許

番号:2008146524

出願年月日:2008/6/4

国内外の別:国内・国外

名称:筋張力推定法及び身体内部の活動情報提示法

発明者:中村仁彦,黒崎浩介,山根克,村井昭彦

権利者:東京大学

種類:特許

番号:2009037252

出願年月日:2009/2/20

国内外の別:国内・国外

名称:逆運動学を用いた動作・姿勢生成方法及び装置

発明者:中村仁彦,鮎澤光

権利者:東京大学

種類:特許

番号:2010133431

出願年月日:2010/6/10

国内外の別:国内・国外

○取得状況(計1件)

名称:筋張力データベースの構築方法、筋張力データベース、筋張力データベースを用いた筋張力計算方法及び装置

発明者:中村仁彦,村井昭彦,高屋定裕,山根克

権利者:東京大学

種類:特許

番号:特許第5229796号

取得年月日:2013/3/29

国内外の別:国内

〔その他〕

ホームページ等

東京大学 情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻 中村研究室:

<http://www.ynl.t.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>

科学研究費補助金 基盤研究(S) 2008-2013:

<http://www.ynl.t.u-tokyo.ac.jp/project/kibanS2008-2013-j.php>

① 研究室のWEBより論文等の情報を公開

<http://www.ynl.t.u-tokyo.ac.jp>

② テレビ

NHK BS-Hi 「アインシュタインの眼」

#122 タップダンス 華麗なる高速ステップの秘密:平成23年1月16日

#113 シューズ 疲れは足元から防げ!:平成22年9月12日

#103 太極拳 身体の中で何が?:平成22年5月2日

NHK 「爆笑問題の日本の教養」平成22年10月26日

「世界一受けたい授業」平成22年2月27日

③ 新聞、その他

2008年6月19日 日本経済新聞,日刊工業新聞

2008年8月30日 デイリースポーツ・オンライン, nikkansports.com、スポニチ・アネックス

2008年8月31日 デイリースポーツ

2009年2月28日 読売新聞,毎日新聞,日本経済新聞、

2009年3月2日 日経産業新聞

2009年6月9日 日本経済新聞

2009年7月 科研費News Vol.1

2011年1月1日 日本経済新聞

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 仁彦 (NAKAMURA YOSHIHIKO)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号:20159073

(2) 研究分担者

山根 克 (YAMANE KATSU)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号:00361543

高野 渉 (TAKANO WATARU)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師

研究者番号:30512090

神永 拓 (KAMINAGA HIROSHI)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教

研究者番号:90571571