

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2006～2009

課題番号：18200013

研究課題名（和文） 全身ダイナミック接触行動のヒューマノイド知能

研究課題名（英文） Humanoid intelligence of whole body dynamic contact motion

研究代表者

國吉 康夫（KUNIYOSHI YASUO）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号：10333444

研究成果の概要（和文）：

ヒューマノイドロボットを介護、災害救助等の支援に適用するには、人体の抱き起こしや大きな重量物の抱え上げなど、全身の各部分で対象物や環境と接触し支えながら扱う機能が不可欠であるが、この機能は従来のロボット学ではほとんど扱われてこなかった。本研究では、ヒューマノイドロボットの全身を覆う柔軟触覚センサを独自に開発、実装し、また人間のスキルの計測とモデル化も踏まえ、それらの情報を活用して全身接触動作を制御する手法を構築し、世界に先駆けて、30kg の箱の抱え上げ動作や 66kg の人体ダミーをベッド上で移動させる動作の実現に成功した。これにより、全身ダイナミック接触行動という新しい分野の基礎を築いた。

研究成果の概要（英文）：

For humanoid robots to assist care-giving or rescue tasks requiring lifting of human body or large heavy items in arms, a functionality to handle objects exploiting contacts between various parts of the body and the target and environmental objects is essential. However, this functionality has been largely unexplored in past robotics. In this research, a novel flexible distributed tactile sensor system is developed which is installed to cover the entire surface of a humanoid robot. Human skill measurements and modeling is also carried out. Based on these, a method of controlling the whole body contact motion exploiting tactile sensors is developed. World's first experiments on lifting in arms a 30kg box and moving a 66kg dummy human body on bed are successfully carried out. The above research established the foundation of the new field of dynamic whole body contact actions.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	11,100,000	3,330,000	14,430,000
2007年度	10,300,000	3,090,000	13,390,000
2008年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
2009年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
年度			
総計	37,200,000	11,160,000	48,360,000

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：感覚行動システム，ヒューマノイド

1. 研究開始当初の背景

ヒューマノイドロボットは将来、人間と密に接しつつ人間を助ける存在として、社会の

様々な局面での活用が期待される。その中でも特に重要な応用として、介護・福祉、災害救助、などがあるが、これらにおいては、人

体の抱き起こしや抱え上げ、瓦礫の排除動作などが必要となる。

これらに不可欠なのは、全身の任意の部位において対象物や環境に接触し、それを活用することで、人体や大きな物体、あるいは自己のボディなどの重量物を自在に扱う行動能力である。

ヒューマノイドロボットの行動生成に関する従来の研究は、主として歩行と手先での物体操作の組合せについて行われて来た。これらにおいて、環境や操作対象物との接触は手先、足裏に限定されていた。例外として、起き上がり動作の研究や転倒時に尻餅をつく研究[1]があるが、手足以外での接地は初期状態ないし最終状態であり、接触動作を積極的に利用するものはほとんどない。唯一、申請者らによるダイナミック起き上がり動作の研究[2]が、背面での転がりを活用した等身大ロボットの全身動作の例となっている。本研究は、この例の発展形といえるが、ヒューマノイドロボットの研究において、全身各部での接触や転がりを積極的に活用する動作は世界的にみても他に例を見ない。しかし、冒頭に論じたように、この種の動作は、全身を最大限活用して大きな作業能力を発揮するために有用なスキルであり、ヒューマノイドロボットの行動能力拡大のために重要である。また、従来の理論・手法で扱うのが困難な問題を孕むため、新たな理論・手法の開拓が期待される。

本研究の中核的なハードウェア技術である全身分布触覚は、僅かしか実現例がない。しかも、従来の実現例は、いずれも人間が意図的に触ることで対話に役立てるためであり、感度やダイナミックレンジが小さい。自己身体や重量物の接触や転がりを検知し、行動制御に活用できるためには、新たな仕様のセンサが必要となる。本研究では世界で始めて、接触行動のための全身分布触覚センサを開発し、実際のヒューマノイドロボットの行動制御に適用する。

参考文献：

[1] 藤原清司 他, 等身大ヒューマノイドロボットの後方転倒制御の実現, 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 4, pp. 45-52, 2005.

[2] 國吉康夫, 大村吉幸, 寺田耕志, 長久保晶彦: 等身大ヒューマノイドロボットによるダイナミック起き上がり行動の実現, 日本ロボット学会誌, vol. 23, no. 6, pp. 66-77, 2005.

2. 研究の目的

本研究は、介護・福祉、災害救助などの応用に向けたヒューマノイドロボットの基盤技

術として、全身の任意の部位において対象物や環境に接触し、それを活用することで、人体や大きな物体、あるいは自己のボディなどの重量物を自在に扱う行動能力の実現を目指す。この能力は以下の要素からなる。

- (1) 全身分布型触覚を活用した自己身体と対象物の接触状態および動力学的状態の認識。
- (2) 任意姿勢での体表面での摩擦、滑り、転がり、ならびに慣性、重力などを活用した自己身体と対象物のダイナミックな運動操作スキル。
- (3) 環境や対象物の状態に応じた臨機応変な全身接触行動戦略の選択や学習。

上記で対象する動作は、多自由度非線形動力学、複雑な接触状態、劣駆動性の転がり運動、物体の変形などを含む極めて複雑な問題となり、従来のロボット制御理論の手に余る。しかし人間は、多少の練習を要するとしても、比較的容易にスキルを獲得し、タスクを達成しうる。本研究では、人間の動作スキルを計測しモデル化することと、それをヒントに実機実験を通して構成的にタスク達成を目指すことで、この新たな動作技能の実現法を明らかにすることを目指す。

3. 研究の方法

本研究は、全身表面を分布触覚センサで被覆したヒューマノイドロボットシステムの構築と全身接触行動制御手法の開発および実験を中核とする。全身接触行動制御手法のヒントを得るために人間の接触行動戦略の計測・モデル化も行う。

- (1) 全身接触動作可能なヒューマノイドロボットシステムの構築：申請者らが開発し既に全身動作実験（起き上がり）にも成功しているヒューマノイドロボット（既有備品）をベースに、多様な作業への適用のための改良を施すとともに、全身表面を分布触覚センサで被覆し、その信号を全身制御システムに統合する。分布触覚センサは、独自開発のプロトタイプをベースに全身実装可能なものを構築し、実際に上記ヒューマノイドロボットの全身に装着する。分布触覚センサの信号は独自のロボット体内通信システムにより全身制御システムに集約する。この触覚情報と既存の運動制御系を統合して、全身接触動作のリアルタイム制御システムを構築する。

- (2) 全身触覚情報処理と全身接触動作制御法の構築：ロボットが全身分布触覚データを

解析し、接触運動状態や対象物の位置姿勢の情報を獲得する手法と、それに基づき、環境との多様な接触運動を活用する全身動作の制御手法を構築する。身体各部での接触力から全身の力学的状態を推定する手法や、限られた関節トルクで重量物を扱うための瞬発力や全身協調などを含む。

- (3) ヒューマノイドロボットによる全身ダイナミック接触動作の実験：まず、全身の様々な部位で環境や対象物と接触し、自己身体を支えたり対象物の状態を知覚する実験を行い、次に、重量物を両腕で扱い支持面上で滑らせる操作の実験を行う。また、瞬発力や全身協調により重量物を効果的にハンドリングする実験を行う。これらを統合して、出来る限り現実の介護場面に似せたセットアップを作り、人体模型をハンドリングするなどの評価実験を行う。
- (4) 人間の全身ダイナミック接触動作戦略の計測、解析、モデル化：人間の被験者による全身ダイナミック接触動作について、モーションキャプチャ装置、床反力計、体表面圧力分布センサ等を統合した精密計測を行い、力学的解析およびモデル化を行う。

4. 研究成果

特筆すべき成果としては、全身を1864点の分布触覚センサでくまなく覆ったヒューマノイドロボットシステムを完成し（二脚二腕型では世界初）、これを用いて、30kgの重量物の抱え上げや66kgの人体ダミーのベッド上引き寄せ動作の実験に世界で初めて成功したことが挙げられる。この成果は、複数の受賞で学術的に高い評価を受けると共に、国内外で広く報道されて一般からの強い関心も寄せられた。

成果の詳細を研究項目ごとに以下に記述する。各項目は密接に相互作用しつつ並行に進めることで全体が段階的に高度化した。

- (1) 全身接触動作可能なヒューマノイドロボットシステムの構築：

ロボット本体（既有装置）を改修し、疲労機械部品の交換、高負荷駆動部の改善、電気回路系の信頼性向上、既存センサ系の信頼性向上、等の改良を施し、より一般的な実験に備えた。次に、柔軟外装と一体化した全身分布触覚センサの開発を行い、上記ロボットのほぼ全表面を覆いつくす実装を行った（図1）。この結果、触覚点数1864という、世界で他に例を見ない全身分布触覚を実現した〔特許2〕。

以上の研究では、背面、腰部、胸部、など大面積の身体表面に関する接触動作を対象とし、実機での実現を含め多くの成果をあげた。これらは本研究の中心的な寄与であり、世界に先駆けて達成したものであった。しかし、実際の作業場面への応用に際しては、腕および手先での探り動作や物体操作機能も統合されねばならない。全身分布用のセンサは空間分解能や関節部での非伸縮性の点でこれらの機能への適用に問題がある。そこで最終年度において計画を変更・延長し、分解能向上と伸縮性実現に関する新たな触覚センサ技術の開発・改良に取り組み、これを達成した。この研究に関連して、ロボティクス・シンポジウム最優秀論文賞を受賞した〔受賞2〕。

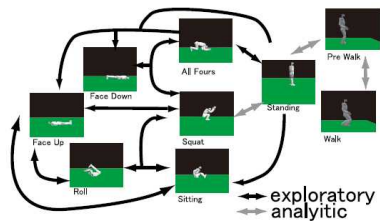


図1：触覚センサの実装

- (2) 全身触覚情報処理と全身接触動作制御法の構築：

触覚情報処理については、まず、分布触覚データの時空間パターン認識によりダイナミックな触覚パターンを識別する手法を構築した。次に、一定条件下での外力推定手法を構築し、これに基づく動作制御法を考案し、重量物操作実験に適用した。また、操作対象物の形状が既知で位置も大まかに既知な場合について、腕や胸、背面等の触覚センサデータから、対象物の位置姿勢を推定する手法を構築し、対象物ハンドリングに利用した〔雑誌論文5〕。

動作制御法については、床面上における任意の全身姿勢、すなわち、仰臥位、伏臥位、座位、中座位、立位など、および歩行、走行などを目標状態として与えたとき、それらを結ぶ全身動作を自動的に生成する手法の構築に成功し、動力学シミュレーション実験で検証した（図2）。これは、いくつかの異なる接触状態を与えたときに、それらを結ぶパスを探索的に求める手法である〔雑誌論文7〕。この研究に従事した学生が日本ロボット学会研究奨励賞を受賞した。



図

図2：全身動作の自動生成

上記手法では、パスの経由点となる重要な接触状態を人が指定する必要があり、それが容易でないという問題があった。この問題を解決する原理を求めて、仰臥位から中座位まで一気に起き上がるダイナミック接触動作について解析と実験を深め、新たな「コツ」ともいえる、不変状態量を見出した。これに着目することで、従来より格段に信頼性よく動作を成功に導くことができる。

適応性や学習に関しては、自己身体と把持物体に関する学習機能を計算論的モデルやニューラルネットワークモデルの形で構築した。また、手探り動作を題材として適応的制御法の構築に取り組み、実機実験による評価を行った。

(3) ヒューマノイドロボットによる全身ダイナミック接触動作の実験：

まず、要素動作として、重量物操作において、腰部で机の縁に接触して身体を支持する動作を実現し、また、椅子への着座動作、壁への寄りかかりなども実現した。

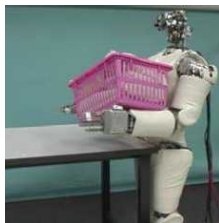


図3：30kgの箱の抱え上げ動作



図4：移動介助動作

[特筆すべき成果]これを踏まえて、全

身接触型重量物ハンドリングの実験に限定条件下で成功を収め、世界初の成果を挙げて報道等でも大きく取り上げられた。具体的には、机上に置かれた30kgの箱を、触覚により状態検知しつつ引き寄せ、腰や胸での机や箱との接触を活用しつつ、瞬発力も利用しながら抱え上げる動作(図3)、ならびに、台上で、両腕上に置かれた66kgのダミー人形を、触覚で垂直抗力を制御しつつ、膝をベッド側面に押し当てて腰を落とす動作で自重を活用しながら一気に引き寄せる動作に成功した[雑誌論文5]。成果は、NHK、TBS、各新聞、および海外メディアで報道された。

(4) 人間の全身ダイナミック接触動作戦略の計測、解析、モデル化：

まず、人間の被験者による抱え上げ等の全身接触動作の精密計測を行い、力学的解析およびモデル化を行った。計測には、3次元運動計測装置(既有設備)を主に用い、人間動作接触力計測装置も試験的に導入した。後者は、人間が物体をハンドリングする際の体表面における接触力を計測するもので、市販品では十分な性能を得られないため本研究で開発した柔軟分布触覚センサを用いて自作した。これら計測結果から、レスキュー隊員や介護士等の熟練者と未経験者の動作戦略の違いが明らかになった。この知見は、全身接触動作制御法の中の、任意の接触状態間を結ぶ動作パス自動生成手法の理論構築に活用された。

また、人間が他者を背負う際に行う背負いなおし動作というダイナミックな接触動作について計測・解析を行い、新たな「コツ」ともいえる不変状態量を見出した[雑誌論文3]。さらに、コツに基づいた運動生成方法のシミュレーション実験を行い、動作制御法の検討を行った。

以上の取り組みにより、人間支援のための全身ダイナミック接触行動という新しい研究分野の基礎が構築された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計31件)

- (1) 國吉康夫, ヒューマノイドロボットの全身ダイナミック接触行動知能の研究, 科研費 NEWS, vol. 3, pp. 9, 2010.
- (2) Cota Nabeshima, Yasuo Kuniyoshi, A

Method for Sustaining Consistent Sensory-Motor Coordination under Body Property Changes Including Tool Grasp/Release, Advanced Robotics, vol. 24, 2010. 査読有

(3) Kunihiro Ogata, Yasuo Kuniyoshi, Analyzing the “Knacks” of Transferring Human and Developing a Two-Body Integrated Model as a Basis for Humanoid Control, Proc. of The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2009), pp. 94-104, Paris, France, Dec. 8, 2009. 査読有

(4) Yuki Fujimori, Yoshiyuki Ohmura, Tatsuya Harada, Yasuo Kuniyoshi, Wearable Motion Capture Suit with Full-body Tactile Sensors, Proc. of 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3186-3193, Kobe, Japan, May 16, 2009. 査読有

(5) Yoshiyuki Ohmura, Yasuo Kuniyoshi, Humanoid Robot Which Can Lift a 30kg Box by Whole Body Contact and Tactile Feedback, 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1136-1141, San Diego, USA., Oct. 30, 2007. 査読有

(6) 長久保晶彦, Alirezaei Hassan, 國吉康夫, 逆問題解析に基づく触覚分布センサ, 日本ロボット学会誌, vol. 25, no. 6, pp. 162-171, 2007. 査読有

(7) Koji Terada, Yasuo Kuniyoshi, Automatic Motion Generation Exploiting the Global Structure of Non-Linear Dynamics Based on Finite Time Reachability, Robotics and Autonomous Systems, vol. 54, no. 8, pp. 696-705, 2006. 査読有
他

[学会発表] (計 22 件)

(1) Hassan Alirezaei, Akihiko Nagakubo, Yasuo Kuniyoshi, Development of a highly stretchable tactile sensor with easy wearability, Humanoids 09 Workshop “Tactile Sensing in Humanoids - Tactile Sensors and Beyond”, Paris, France, Dec. 7, 2009.

(2) Alexandre Pitti, Hassan Alirezaei, Yasuo Kuniyoshi, Modeling the Human Sense of Touch and Agency in Multi-Modal Networks of Spiking Neurons, Humanoids 09 Workshop “Tactile Sensing in Humanoids - Tactile Sensors and Beyond”, Paris, France, Dec. 7, 2009

(3) 國吉康夫, 身体が振る舞いをつくるロボットを通してみる、かたちとインタラクションの創発的關係, ユニバーサルデザイ

ンビジネス・シンポジウム 2009, 2009 年 12 月 4 日, MEGA・WEB(青海)

(4) 尾形邦裕, 白松大祐, 大村吉幸, 國吉康夫, 人型ロボットのための人の背負い直し動作の計測とコツの解析, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会, 2009 年 9 月 17 日, 横浜国立大学

(5) 國吉康夫, 人型ロボットを用いた動作の“ツボ”の解明と認知発達原理の先駆的研究, 東京テクノ・フォーラム 2 1 「ゴールド・メダル賞」受賞記念講演会, 2009 年 6 月 2 日, 発明会館(虎ノ門)

(6) 大村吉幸, 國吉康夫, 分布触覚を利用したヒューマノイドの動的起き上がり動作, 第 24 回日本ロボット学会学術講演会, 2006 年 9 月 14 日, 岡山大学
他

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 4 件)

(1) 出願番号: 特願 2009-289596

発明の名称: 通信ノード及び通信システム
発明人: 國吉康夫, 大村吉幸, 長久保晶彦
出願人: 国立大学法人東京大学・独立行政法人産業技術総合研究所

(2) 出願番号: PCT/JP2006/317541

公開番号: 特開 2007-78382

発明の名称: 触覚センサ用モジュールおよび触覚センサの実装方法

発明人: 國吉康夫, 大村吉幸, 瀬田尚子, 長久保晶彦

出願人: 国立大学法人東京大学・独立行政法人

外国出願: 米国、カナダ、欧州、中国、韓国に移行出願中

他

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

○受賞歴

[賞] (計 5 件)

(研究業績賞 1 件, 国内誌論文賞 1 件, 国際会議論文賞 1 件, 国内会議優秀論文賞 1 件, 国内学会研究奨励賞 (指導学生) 1 件)

(1) 東京テクノフォーラム 2 1 ゴールドメダル, 受賞者: 國吉康夫, 「人型ロボットを用いた動作の“ツボ”の解明と認知発達原理の先駆的研究」, 受賞日: 2009 年 4 月 17 日

(2) 第 14 回ロボティクス・シンポジウム 最優秀論文賞, 受賞対象: 長久保晶彦, Alirezaei Hassan, 國吉康夫, “動的伸縮に対して安定計測可能な触覚分布センサ”, 受賞日: 2009 年 3 月 16 日

他

○報道等

テレビ放送(計 11 件)

(1) 2010 年 3 月 23 日 18:00~18:10 NHK 総合 NHK ニュース「介護ロボットへの応用期待 特殊スーツ」

(2) 2007 年 5 月 25 日 17:40~ フジテレビ FNN スーパーニュース「最新ロボット事情 両腕で”よいしょ” 重い荷物を抱え上げ」

(3) 2007 年 3 月 28 日 17:00~ NHK ゆうどきネットワーク「”従来の 3 倍” 持ち上げる人型ロボット」

(4) 2007 年 3 月 28 日 17:00~ TBS イブニングファイブ「30 キロの箱を持ち上げる 世界で初めて 将来は家事や介護も」

他

新聞掲載(計 44 件)

日付 面 新聞名 題名

(1) 2010 年 3 月 24 日 日本経済新聞 42 介護・スポーツ 技盗め 体に加わる力 CG で表示 東大が特殊スーツ開発

(2) 2010 年 3 月 24 日 朝日新聞 37 加わる力 示せます

(3) 2010 年 3 月 24 日 読売新聞 37 体の動きを測定 着てみてスーツ 世界初 東大教授ら開発

(4) 2009 年 10 月 19 日 読売新聞 13 テクノフォーラム 21 ゴールドメダル賞 3 氏講演 立ち上がりのコツ解明 国吉康夫氏 東京大教授

(5) 2009 年 4 月 20 日 読売新聞 11 東京テクノフォーラム 21 ゴールドメダル 3 氏の業績「ツボ」押さえた人

(6) 2009 年 4 月 18 日 読売新聞 33 ゴールド・メダル賞「東京テクノ・フォーラム 21」受賞者と授賞テーマ：国吉康夫・東京大教授「人型ロボットを用いた動動作の“ツボ”の解明と認知発達原理の先駆的研究」

(7) 2007 年 3 月 29 日 日本経済新聞 (企業 1) 66 キロ人型模型軽々移動 人型ロボ東大が開発 介護支援など視野

(8) 2007 年 3 月 28 日 毎日新聞 ロボット:66 キロの人体模型を抱き寄せる 東京大で公開

(9) 2007 年 3 月 28 日 産経新聞 世界初! 人型ロボット 30 キロを「よっこらしよ」

他

○ホームページ

<http://www.isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp/publication/php>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

国吉 康夫 (KUNIYOSHI YASUO)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号：10333444

(2) 研究分担者

長久保 晶彦 (NAGAKUBO AKIHIKO)

独立行政法人産業技術総合研究所・研究員

研究者番号：00357617

(H18~H19)

山本 知幸 (YAMAMOTO TOMOYUKI)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・特任

研究員

研究者番号：90345653

(H19)

(3) 連携研究者

長久保 晶彦 (NAGAKUBO AKIHIKO)

独立行政法人産業技術総合研究所・研究員

研究者番号：00357617

(H20~H21)

山本 知幸 (YAMAMOTO TOMOYUKI)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・特任

研究員

研究者番号：90345653

(H20~H21)