

平成 30 年 6 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2017

課題番号：26700022

研究課題名(和文) ヒューマノイドにおける道具環境身体利用形態の変節点知覚に基づく行動計画と動作獲得

研究課題名(英文) Humanoid's behavior planning and motion acquisition based on changing in tool-environment-robot relationship

研究代表者

野沢 峻一 (Nozawa, Shunichi)

東京大学・情報理工学系研究科・特任講師

研究者番号：80707620

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、ヒューマノイドが脚立を運び登るような、道具・環境・身体の関係性が変化する行動の計画法・動作獲得法を明らかにすることである。

(1) 質量や摩擦などの物理特性が未知な対象でも、試しに動かす簡便な探り動作の変節点を知覚し物体特性に関する不等式を推定し、物体運搬、道具上に搭乗した状態での運動が統一的に実現可能であると明らかにした。さらに、これに基づく道具環境利用形態の変化を伴う行動計画法を示した。(2) スーツ、スケータなどの着脱型・搭乗型道具の利用時の動作生成法を明らかにした。(1)(2)ともに等身大実機ロボット・実環境で実証実験を通し方法論の実現性を示した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is revealing a method to plan the behavior of a humanoid robot and to acquire its motion, in which the tool-environment-robot relationship changes, such as carrying and climbing a movable stepladder.

(1) We proposed a method to detect the changing in force measurements through simple probing operations, to estimated an object-unknown-properties-related inequality based on it, and to generate motion by considering the estimated inequality. Even if the object properties are not known, such as mass properties and friction properties, we showed that the method uniformly achieves the humanoid manipulation for carrying objects and motion on a movable object. (2) We showed motion generation for attach-detach-type tool and riding-type tool, such as clothes and skaters. For both (1) and (2), we verified the feasibility of the proposed methods through the experiments using the real life-sized robots and the real environments.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：ヒューマノイドロボット 道具環境利用行動 未知物理特性推定

1. 研究開始当初の背景

人間の家庭環境や屋外環境などでロボットが人間を支援する行動が期待されており、行動実現の研究が世界的にも行われている。特に二脚二腕ヒューマノイドは形態的に人間に近く、広範囲で行動可能であり、人間が使う道具やインフラストラクチャをそのまま利用できる利点がある。

一方、現状のヒューマノイドが実環境中で人間並みに広範囲で移動し、道具環境利用行動を行うのは困難である。これは、道具・環境・ロボット身体の関係は固定的でなく利用形態により変化し、ロボットが行動計画動作生成時に如何に変化を扱うか、関係の変化をロボットが如何に知覚するか等の2点が課題であるためである。従来行われてきているような道具・環境・ロボット身体間の関係性を固定的に扱う方法だけでなく、変化を伴うような行動を統一的に実現する方法論を明らかにすることが不可欠と考え、本研究の着想を得た。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ヒューマノイドが脚立を運び登るような、道具・環境・ロボット身体の関係性が変化する行動の計画法・動作獲得法を明らかにすることである。本研究では、道具・環境・身体の利用形態変化を扱う行動計画法、利用形態変化に伴う変節点の能動的知覚に基づく動作獲得法、変節点知覚のための着脱可能道具利用法、に焦点を当てる。

3. 研究の方法

理論的な問題の定式化だけでなく、複数の等身大ヒューマノイドロボット(川田工業製2脚2腕型HRP-2, 研究室開発2脚2腕型JAXON, 研究室開発2脚型URATALEG)を活用し、小型軽量物品から大型重量物品までの実際の道具利用を対象とし、方法論とロボット行動の評価を実証的に行う。

4. 研究成果

ロボットの道具環境利用行動における関係性変化として、道具・環境・ロボット間の接触の関係性の変化、行動時の対象の利用形態の変化の2点に着目した。以下では、操作の対象となる道具や環境を単に物体、対象とならないものを単に環境と呼ぶ。本研究の成果を、以下では(1)物体特性が未知な場合であっても、力覚計測による変節点知覚に基づき、接触関係変化・利用形態変化を知覚し適応的に動作する動作獲得法・行動計画法、(2)搭乗型および着脱道具利用のための運動生成法の2点に焦点をあて説明する。

(1) 物体特性が未知な場合の変節点知覚に基づく動作獲得法・行動計画法(学会発表): 道具利用行動時には、対象となる物体の特性が未知であることが大きな課題となる。物体操作時には、物体の質量や摩擦などの物理特性が一般には未知である。ロボットが物体特性を知るためには、ロボットが物体を試しに動かし、能動的にセンサ情報および物体情報を取得する探り動作が有用

である。一方、ロボットがバランスを維持し物体を動かす操作の計画と制御には、物体の物理特性を知っておく必要がある。そのため、推定と操作の間には因果性のジレンマがある。物体・環境・ロボット間の接触関係が変化する場合や、利用形態が変化する場合にこのジレンマが大きな問題となる。関連研究を通してこの問題は十分に解決されていなかった。

本研究では、関係性が変化する変節点の知覚に着目し、推定・動作生成・行動計画が構成可能になることを明らかにした。具体的には、力覚的な変節点の知覚に利用可能で、物体未知特性が一つの不等式に集約される新しいロボット・物体の定式化を提案した。

物体特性の不等式に基づく変節点知覚が、推定に利用可能であることを示した。物体特性の不等式そのものをロボットの定式化に追加することで、物体操作の定式化が表現可能であることを示した。探り動作を物体リーチング後に挿入することで、接触関係変化および利用形態の変化を伴う道具利用行動計画が可能であることを示した。等身大ヒューマノイドロボットで多様な未知特性物体の操作が実現可能であることを示した。

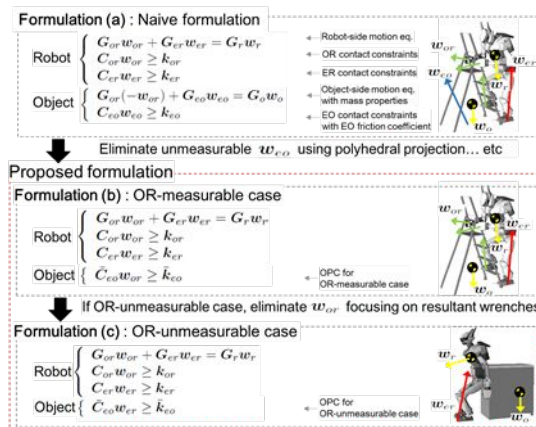


図1 新しい定式化導出過程

物体操作の定式化として、ロボット物体環境の間に成立する2体問題の定式化がナイーブな方法として用いられる(図1a)。ナイーブな定式化では、物体環境間接触力がロボットの力センサでは計測できず、そのため本来ロボットは物体環境間の変節点を知覚することが困難である。本研究では、この計測不可な接触力を消去する定式化を導出した(図1bとc)。これにより、ナイーブな定式化では物体特性を含む式が接触の不等式、運動方程式の2者に分離されていたが、提案定式化では物体特性が集約された一つの不等式が得られることを明らかにした。

物体特性の不等式自体を推定する新しい推定法を提案した。図2に持ち上げ操作の例を示す。図2Aはロボットがリーチングし、物体に力を加える様子である。物体環境間の力は負にならないと制約を受ける(引っ張り力を発生できない)。そのためロボットが

徐々に力を加えると、物体環境の間の力が0になる際に、接触力のプロファイルに変節点が生じ、接触状態が変化する(図2B)。本研究では、この関係性を物体特性の不等式を利用することで、物体環境間接触力が知覚できない場合でも適用可能なことを示した(図2C)。この場合、接触状態変化は、物体特性の不等式の境界に達したことに相当し、物体特性を利用した力の知覚情報に変節点が現れたときを制約境界到達および接触変化とみなせる。この際に知覚される力は、物体特性の不等式の制約境界に相当する。持ち上げ例の場合、制約境界は物体自重となる。そのため、制約境界を推定することは、物体自重を推定することに相当し、物体自重を支える力をロボットが発生し、バランス維持しながら操作可能となる。関連研究では、物体特性(質量、重心位置、摩擦係数など)を個別に分離し推定する方法が採用される。これに対し本研究では、変節点知覚により物体特性の不等式そのものを推定する。物体特性の不等式には特性が個別に含まれるのではなく混合項が含まれ、個別な推定を要さずこの混合項の推定を行うことで、多くの場合で操作が実現可能であることが理論的に示した。

図は持ち上げ操作の例であるが、押し操作、傾ける操作といった物体環境の接触変化方法に多様性があっても本研究は適用できることを明らかにした。またロボット側の接触方法が、手足に力センサを有するロボットの場合に、ロボット搭載の力センサで知覚できる単腕操作、双腕操作といった操作だけでなく、全身接触操作にも適用でき、さらには複数のロボットによる協調操作などにも利用可能であることを示した。全身操作では、ロボット物体間の接触力が必ずしも全て知覚できない(学会発表)。この場合でも、物体特性の不等式がロボット環境間の接触力(多くの場合足床間力)で構成でき、適用できることが分かった(図1c)。

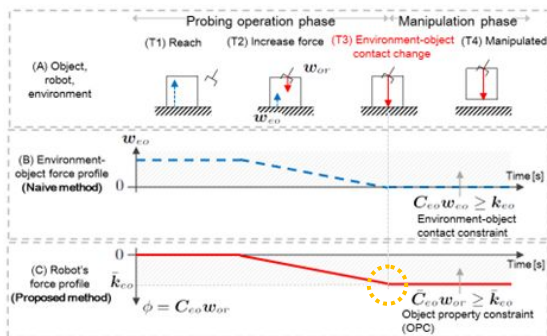


図2 物体操作例と力の変節点の様子

ロボットが物体の特性を考慮し物体操作のための運動計画と制御を行う場合、物体特性を個別にパラメタとして表現し、特に物体環境間接触力の影響を受ける操作の場合は、物体環境間接触力も変数として導入する方法が、関連研究で多く採用される。これに対し本研究では、物体の情報が物体特性の不

等式に集約されるため、ロボット単体の定式化および既存のロボット計画制御手法に、物体特性に関する不等式条件、およびそれを等式として表現しなおした等式条件を追加することで、簡便に操作の計画制御が表現できることを示した(図1bとc)。また、この場合に変数やパラメタを追加せず条件式を追加することとなり、計算量・実装の容易さの面でも有利であることが期待できる。

道具環境利用行動では、物体へのリーチング、操作、リリースなど、物体環境ロボットの接触関係が切り替わる。物体へのリーチングと操作の間に探り動作を挿入する、物体の未知特性に適応する行動計画法の構成を示した。この探り動作は個別な特性を全て推定するものでなく、物体特性の不等式そのものを推定する探り動作であり、比較して少ない回数の探り動作の挿入で、操作が実現可能であることが分かった。また、脚立を運搬対象として運ぶ、脚立を接地しその上に搭乗するなどの利用形態に応じた変化のある場合も、本研究では統一的な方法で物体特性の不等式を変節点知覚により推定できた。

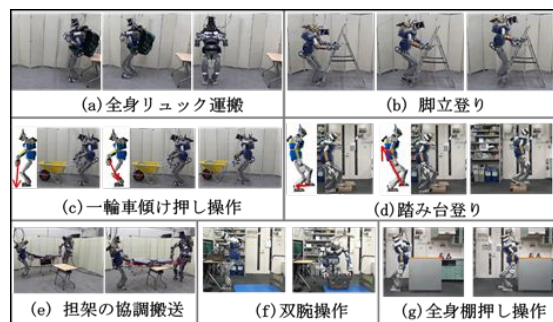


図3 等身大ロボットの多様な物体操作

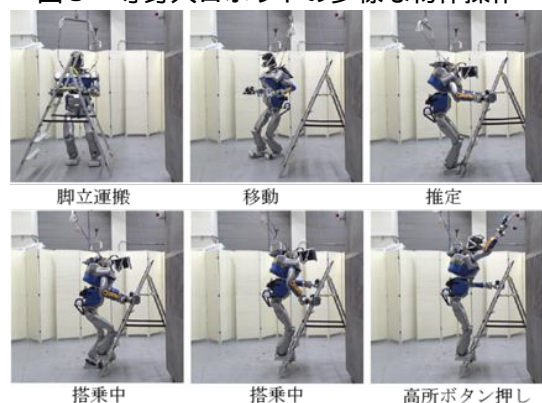


図4 利用形態変化含む脚立運搬登り

上記の理論的枠組みを実証するため、ロボット実機を用い、特性が未知な物体であっても多様な物体操作を実現可能であることを明らかにした。図3は多様な操作の実験例を示す。双腕での持ち上げ(f)、傾け押しを複合させた操作(c)、全身を用いた操作(a,g)、2台ロボットによる協調操作(e)などで、リーチング後にロボットが力覚による変節点知覚に基づき推定を実行し、物体特性が未知であってもロボットが転倒することなく

操作が実現可能であることを示した。その他、物体に搭乗するような場合も (b,d), リーチング後, 搭乗行動の前に変節点知覚による推定を実行し, ロボットおよび搭乗対象の物体が転倒や滑りを起こすことなく, 登り動作を実現できた。図4は, 利用形態の変化も含めた道具利用行動である。ロボット単体では手が届かないような高所のボタンを押す行動を行っている。ロボットが運搬対象として脚立を運び, 次に脚立に登ることでボタン押し動作を実現している。

(2) 前項で述べた運搬対象としての道具利用の他に, 搭乗型道具, 着脱道具, 着脱搭乗型道具の3点について道具利用時の運動生成法自体が課題であることが分かった。実証実験を通してそれぞれの運動生成法を示した。

搭乗型道具は, ロボットが道具の上に搭乗し, 力学的に環境から反力を受けず物体のみから反力を受ける行動であり, 固定ロボット・移動ロボット両者の関連研究でも, 扱われる例は少ない。本研究では, 脚立を登るなど, 対象を静止させた状態を維持する利用行動 (図3b, d), 三輪車に乗るなど対象を運動させる利用行動 (図5, 雑誌論文) をロボット実機で実現した。後者の図5では, 前項の方法と異なり物体特性不等式の推定を伴わないが, ペダルやハンドルなどの可動方向に適応的な行動生成を行うことで不用な負荷なく搭乗型道具利用行動を実現した。



図5 三輪車操作によるロボット移動

着脱型道具は, ロボットの身体に着脱が可能道具を表す。本研究では着脱型道具の例として, 着衣スーツの水中歩行への利用行動を検証した (図6, 学会発表)。検証した脚型ロボットは防水加工を有さないが, スーツ着用行動により水中環境への適用が可能となった。また, ロボット動作制御のために環境からの反力計測が不可欠であり, スーツ着用により計測が影響を受ける。本研究では, スーツの着用により生じる力をあらかじめ陸上で計測し除去することで, 水中での力覚計測が可能であることを実機検証により示し, 水中歩行へ適用できることを示した。

本研究では, 着脱型, 搭乗型の特性を有する複合的な道具利用行動も扱った。具体的には, キックボードやスケータ利用行動に相



図6 着衣型道具の利用と水中歩行への適用

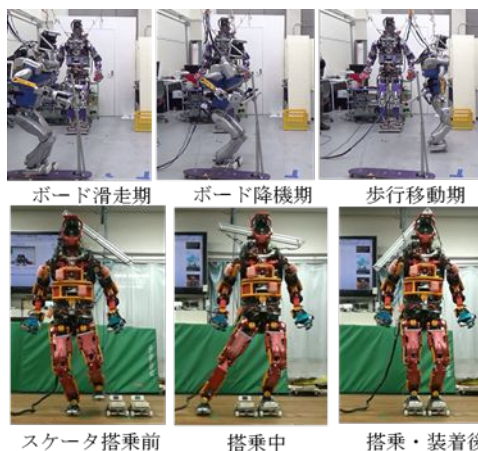


図7 搭乗着脱道具への搭乗・降機動作

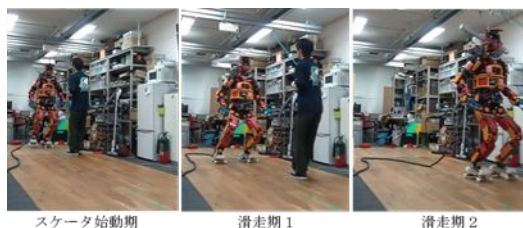


図8 スケータ利用滑走行動

当する。図7は, ロボットがキックボードやスケータに乗り降りする運動生成例である (学会発表)。これらの道具利用行動の場合, ヒューマノイドロボットが本来有する脚移動機能の他に, 車輪などの特殊な移動行動を実現する必要がある。本研究では, 車輪により生じる接触制約条件をロボットの脚移動時の接触制約条件と同様に扱い, それらを重心の運動に関する制約として扱うことで, 脚移動・車輪移動の両者を扱う方法を提案した。これらも含めたシステム統合により, スケートイング動作を実現した (図8)。

以上(1)(2)をまとめると, 本研究では等身大ヒューマノイドロボットの接触状態の変化・利用形態の変化を伴う道具利用行動を実現し, 方法論を明らかにした。

ロボットの行動の種類観点で, 図3の例のように統一的な方法で多様な操作を実現する一般性を本研究は有することが分かった。加えて, 脚立登りなどの搭乗型道具利用, 重量対象の等身大ロボットによる協調搬送など, 世界的にも関連研究では実現されていない新規なロボット行動を実現可能であることを明らかにした。また方法論の観点で, (1)および図3, 4に示すような単一物体の準静的操作, 対象を動かさない搭乗型道具利用行動に関しては, 変節点知覚が接触変化検知および必要な推定機能に相当することを理論的・実証的両方の側面から統一的に論じ, ロボットの行動を実現した。これはロボットが探り動作を通し, 物体が動いた, 傾いた, 滑ったといった簡易な変節点の知覚により物体操作を実現できることを示す。また, 本研究はヒューマノイドロボットだけでなく, 未知特性の物体を扱う任意のロボットの理

論および応用用途へ波及することが期待できる。

一方、(2)に示す方法は物体の動的な運動の寄与が大きい搭乗型・着脱型道具の利用行動であり、これらの未知特性の推定・動作獲得法などの対処は今後の課題として残るが、(1)に述べた方法を拡張することで適用できると期待できる。なお、未知特性の扱いに課題が残るものの、(2)の行動実現例も動的なスケータリング動作など過去の研究と比較しても特徴的なものとなっている。

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1件)

木村 航平, 野沢 峻一, 垣内 洋平, 岡田 慧, 稲葉 雅幸, 能動機能と受動機能の切替制御システムを備えたヒューマノイドの双腕双脚による三輪車操作行動, 日本ロボット学会誌, Vol.34, No.7, pp.468-477, 2016. (査読有)

[学会発表](計8件)

唐澤達史, 野沢峻一, 垣内洋平, 岡田慧, 稲葉雅幸, 等身大ヒューマノイドロボットにおける防水外装着用時の足先反力計測と歩行動作の実現, 第15回 SICE システムインテグレーション部門講演会講演概要集, pp.2283-2286, 2014.

Shunichi Nozawa, Eisoku Kuroiwa, Kunio Kojima, Ryohei Ueda, Masaki Murooka, Shintaro Noda, Iori Kumagai, Yu Ohara, Yohei Kakiuchi, Kei Okada, Masayuki Inaba, Multi-Layered Real-Time Controllers for Humanoid's Manipulation and Locomotion Tasks with Emergency Stop, in Proceedings of the 2015 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.381--388, 2015. (査読有)

高杉憲明, 小島邦生, 寺澤良, 石川達矢, 野沢峻一, 垣内洋平, 岡田慧, 稲葉雅幸, 足裏反力制御によるスケートボードの踏込滑走動作実現, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'16 講演論文集, 2A1-12a6, 2016.

Noriaki Takasugi, Kunio Kojima, Shunichi Nozawa, Yohei Kakiuchi, Kei Okada, Masayuki Inaba, Real-Time Skating Motion Control of Humanoid Robots for Acceleration and Balancing, in Proceedings of The 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1356-1363, 2016. (査読有)

野沢 峻一, 野田 晋太郎, 室岡 雅樹, 岡田 慧, 稲葉 雅幸, 物体環境制約推定に基づくヒューマノイドの軌道計画法と可動物体上運動への応用, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'17 講演論文集, 1A1-007, 2017. (査読有)

Shunichi Nozawa, Shintaro Noda, Masaki Murooka, Kei Okada, Masayuki Inaba, Online Estimation of Object--Environment Constraints for Planning of Humanoid Motion on a Movable Object, in Proceedings of The 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1291--1298, 2017. (査読有)

野沢峻一, 室岡雅樹, 野田晋太郎, 小島邦生, 小椎尾侑多, 垣内洋平, 岡田 慧, 稲葉 雅幸, ヒューマノイドによるオンライン物体環境制約推定に基づく質量摩擦未知な物体の多様な操作の統一の実現法, 第35回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2L1-06, 2017.

Shunichi Nozawa, Masaki Murooka, Shintaro Noda, Kunio Kojima, Yuta Kojio, Yohei Kakiuchi, Kei Okada, Masayuki Inaba, Unified Humanoid Manipulation of an Object of Unknown Mass Properties and Friction based on Online Constraint Estimation, in Proceedings of the 2017 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.249--256, 2017. (査読有)

[その他]

ホームページ等: 本研究では, 研究成果の一部をオープンソースソフトウェアとして公開することで, 成果の発信を行っている。以下はその代表的なものである。

道具環境記述利用可能なロボットプログラミング言語

(<https://github.com/euslisp/EusLisp>), 道具環境記述利用の動作生成ソフトウェア

(<https://github.com/euslisp/jskeus>), ヒューマノイドロボットの実時間動作制御プログラム

(<https://github.com/fkanehiro/hrpsys-base>),

ヒューマノイドロボットの視覚認識動作制御統合ソフトウェア群

(https://github.com/start-jsk/rtmros_common)

実行可能な道具環境利用行動プログラム群

(https://github.com/jsk-ros-pkg/jsk_demos)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野沢峻一 (NOZAWA, Shunichi)

東京大学・情報理工学系研究科・特任講師
研究者番号: 80707620

(4) 研究協力者

東京大学・情報理工学系研究科・情報システム工学研究室諸氏 (JSK laboratory members)