

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 24 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21680020

研究課題名（和文）多軸センサ肉質ヒューマノイドの注意制御に基づく柔軟密着行動の自律発達システム

研究課題名（英文）Developmental System Based on the Attention Control of Humanoid Robot with Sensor Flesh Embedded with Multi-axes Tactile Sensors

研究代表者

吉海智晃（YOSHIKAI TOMOAKI）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任講師

研究者番号：60436558

研究成果の概要（和文）：本研究では、柔軟触覚センサ外装を備えたロボットにおいて多様な接触情報を検知可能なハードウェアと、全身からの大量のセンサ情報を元に行動学習を行うソフトウェアの構成法を明らかにすることを目的として、小型・等身大の2種類のヒューマノイドにおける多軸触覚センサ外装の実装法を明らかにした。また、大量の分布センサ情報をオンライン粗密構造化する手法を提案するとともに、密着タスク実行中のタスクの遂行と馴染み機能の同時実行を実現する身体負荷の逐次評価に基づく強化学習システムを構築した。

研究成果の概要（英文）：The aim of this research is to clarify the method to construct both hardware and software for humanoid robots with multi-axes soft tactile sensors. As results of this research, soft sensor exteriors embedded with multi-axes soft tactile sensors for both small and adult-size humanoid robots are developed. Also, method to make structured data for the enormous amount of distributed tactile sensors is developed for them. Furthermore, reinforcement learning system which adjusts a function of adaptation during close interaction behavior between the robot and an object is developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	10,300,000	3,090,000	13,390,000
2010年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2011年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
年度			
年度			
総計	21,100,000	6,330,000	27,430,000

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：柔軟肉質センサ外装，ヒューマノイドロボット，身体負荷監視評価構造，柔軟密着行動

1. 研究開始当初の背景

早稲田，産総研，ホンダ，トヨタ，東大など，従来開発されてきた多くのヒューマノイドでは，硬い剛な身体における環境との限定的な接触状態をどう扱うかという問題に取り組んできたものが多かったが，本研究課題

では，環境中の事物や人間と全身での柔らかな密着行動を扱うことを考える．そのような問題を扱うためには，全身を柔軟な肉質で覆い，その接触状態を各所に分布させた多数のセンサによって検知できるヒューマノイドでなくてはならない．我々は，これまでの研究成果の中で，柔軟肉質を持ち，その内部に

3 軸力覚センサを多数分布させた小型ヒューマノイドロボットを開発してきており、この研究成果をベースにして、さらに多様な皮膚センシングの可能なマルチモーダルな多軸センサ埋込型肉質を備えたヒューマノイドを開発する。また、我々は、並列な注意制御に基づく自律反応行動統合システムとして、これまで、並列監視評価構造と名付けた枠組みを開発してきおり、超多自由度筋骨格ヒューマノイドの行動生成や前述の柔軟センサ肉質を有するヒューマノイドにおいてその実現可能性を検証してきている。

本研究では、これらの研究を発展、融合させることで、柔軟多軸触覚センサ外装を備えたヒューマノイドロボットにおいて多様な接触情報を検知可能なハードウェアと、全身からの大量のセンサ情報を元に行動学習を行うソフトウェアの双方の構成法を明らかにする。

2. 研究の目的

全身の広い領域で行動の対象に密着することができ、その状態を把握しつつ動作を行えるようにすることで、ヒューマノイドの行動領域は従来の接触箇所を限定しモデル化していく手法と比べ、大きな広がりを持つことが可能になる。そのためには、環境中の事物や人間と柔軟に接触するための肉厚の外装で全身を覆い、その外装自体に多様な触覚センシング機能を持たせることにより様々な接触状態を検知して反応を返すとともに、行動中の触覚状態変化に応じて行動自体を発達させていくことの可能なシステムを構築することが重要である。そこで、そのような柔軟密着を行い、その際に多様な接触情報を検知可能な柔軟外装を備えたハードウェアシステムと、そこで得られる全身からの大量の分布センサ情報を元に行動学習を行うソフトウェアシステムの双方に関する構成法を本質的に明らかにする必要がある。

本研究課題では、多軸柔軟触覚センサを核として、様々な柔軟触覚センサを柔軟肉質外装に埋め込む形のヒューマノイドロボットのシステム構成法を明らかにすることを目的とする。そして、そこでのソフトウェアの構成法として、大量の感覚情報処理に関し、オンラインで情報の構造化を行う手法を開発すると共に、密着行動タスクにおいて、適切に馴染みとタスクの同時実行を可能にする行動学習システムの構成法を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) マルチモーダルな多軸センサ埋込型全身柔軟肉質外装を備えたヒューマ

ノイドロボットシステムの開発

これまで開発してきている柔軟センサ肉質を持つ小型ヒューマノイドを進展させ、3軸柔軟触覚センサの埋め込まれた厚肉柔軟外装と組み合わせることの可能な新たな柔軟触覚センサを開発し、実際のロボットに装着させて、行動実験を通して検証を行う。また、等身大ヒューマノイドにおいても多軸柔軟センサを備えた柔軟外装システムを構築し、提案センサシステムの適用可能性を検証する。

- (2) プログラマブルかつ省配線な高機能触覚センシングネットワークシステムの構築

センサ数の増大に応じた配線の増加を抑え、刺激に応じた情報量の調節をデバイスレベルで行うために、プログラマブルかつ省配線な触覚センシング基板を新たに開発する。センサ情報をAD変換する周期を自在に変更可能な小型マイコンチップ搭載基板を用いてバス型の高速体内ネットワークを構成することで、省配線化を図りメンテナンス性を向上させた分布触覚センサネットワークシステムを構築する。

- (3) 状態変化速度に基づく分布触覚情報のオンライン構造化手法の開発

全身を多種多様な分布センサで覆うヒューマノイドでは時々刻々と膨大な量の感覚情報が得られるが、そのセンサ情報は時間的、空間的に必ずしも常に同じ粒度で必要ではない。そこで、個々のセンサの状態変化速度に着目して、時間的・空間的なフィルタリングを行う分布触覚情報のオンライン構造化手法を開発する。

- (4) 身体負荷に対する並列監視評価構造を備えた行動システムの構築

対象と密着して行う行動においては身体の広い領域での接触が発生し、常に多方向から力が加わるため、自己の破壊を防ぐために、自らの身体の負荷をうまく低減し、馴染んでいく機構が必要不可欠なものとなる。そこで、ここでは、特に瞬間的な負荷としての「痛覚」と時間的蓄積負荷としての「疲労」という観点から身体負荷を常時監視して評価するシステムをタスク実行システムと並列に動作するものとして構築する。

- (5) 柔軟密着タスクと身体負荷低減のための馴染み作用の同時実行を実現する行動学習システムの構築

身体の広い領域で対象と密着しながら動作する場合、過負荷を避けつつ行動学習を行っていくためには、身体負荷を軽減するための馴染みとタスク自体の学習を同時に行う必要がある。密着状態での行動学習として全身で力を感じることが可能な身体では、人間が直接的に接触力を教示することが可能になる。対象を認識し、その対象に対する接触力変化の系列の概略を記憶し、動作再生時に記憶された接触力変化になるようにフィードバックを行う系を構築することで密着状態での力変化の教示が可能になると考えている。ここでは、そのような記憶された力の再生と同時に逐次学習で「痛覚」と「疲労」という形で表現される身体負荷を低減する馴染み動作を統合するように学習を行うシステムを実現する。

4. 研究成果

(1) 全身柔軟肉質外装を備えたヒューマノイドロボットシステムの開発

これまで研究代表者らが開発してきた3次元柔軟変形触覚センサを全身に備えた肉質外装ロボットを用いて多様な対人、対物接触行動を行うことで全身柔軟肉質センサ外装システムの評価を行い(図1)、改良を行うことで、等身大ヒューマノイドタイプへの



図1：3軸柔軟触覚センサを備えた小型ヒューマノイドロボット

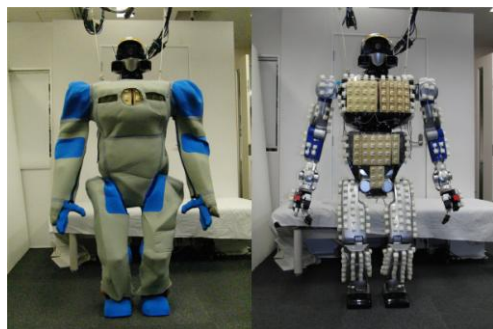


図2：多軸触覚センサ埋込肉質外装の等身大ヒューマノイドロボットへの適用

展開を実現した(図2)。図2の等身大ヒューマノイドロボットにおいては、全身で351個の3次元柔軟変形センサを備えており、安定して全身の肉質変形を計測可能なシステムを実現した。

一方、これまでの3次元柔軟変形触覚センサを補い、多様な触覚センシングを可能にするために、新たに異なる二種類の柔軟触覚センサを開発した。まずは、これまでの厚肉外装の深部に埋め込まれた肉質変形センサでは検出が難しかった外装表面における撫でなどの軽い接触、変形を検出できるようにするため、伸縮可能なニットセンサを開発した。



図3：撫で検出可能な伸縮ニットセンサ外装

図3に小型ヒューマノイドロボット用に開発した上半身カーディガンタイプのニットセンサとそれを装着した様子を示す。

このニットセンサにおいては、分布させた75個の電極で1軸の力をアナログで検出することが可能であり、柔軟性を損なうことなく、身体にフィットさせることができるため、これまでに用いてきた3次元柔軟変形触覚センサを埋め込んだ厚肉ウレタン外装との併用が可能である。

次に、これまでの3次元柔軟変形触覚センサ単体では検出が難しかった肉質の捻り方向への変形を検出可能な4軸柔軟変形センサを開発した。開発したセンサ(図4)においては、超小型MEMS加速度・角加速度センサを対向配置し、回転運動推定を行うことにより、捻りを含む4軸の肉質変形をリアルタイムに検出することを実現した。

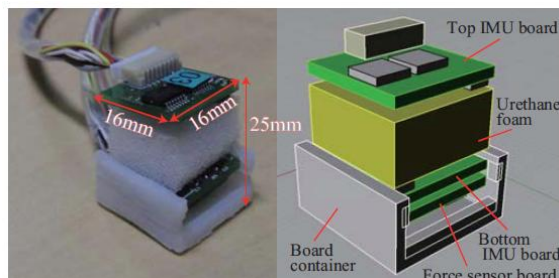


図4：捻り検出の可能な4軸柔軟触覚センサ
開発した4軸柔軟触覚センサの諸元は3軸柔軟変形センサとほぼ同じであり、ロボットの手先など捻り変形の検出が必要な部位に配

置する形でこれまでのセンサと併用するのが良いと考えられる。

(2) プログラマブルで省配線な触覚センサネットワークシステムの構築

分布触覚センサシステムの実現に伴う、触覚センサの物理配線の煩雑化および、そこに流れる情報量の肥大化に対処するために、上位制御プログラムから AD 変換結果のホストコンピュータへの送信粒度を調節可能で、なおかつ省配線な触覚センサシステムを開発した。具体的には、各センサユニットにプログラマブルな超小型マイコンを内蔵させたセンサ基板を開発し、センサ間は、ディジチチェーン接続により省配線な RS485 規格で双方向に通信可能とする一方で、PC・センサ間は取り扱いの良さを重視し、RS485 の信号を USB 信号に変換する通信基板の開発及び、ファームウェア、ドライバソフトウェアの開発を行った。

(3) 状態変化速度に基づく分布触覚情報のオンライン構造化手法の開発

上記(2)のセンサ基板を利用することで、時々刻々と変化するセンサ計測値の変化速度に応じて AD 変換結果のホストコンピュータ側への送信粒度を調節するとともに、各センサ素子の AD 変換送信粒度と互いの空間的位置関係に基づきクラスタリングを行うことで、触覚情報の時空間方向への粗密構造化をオンラインで行う手法を開発した(図5)。ここでは、処理のリアルタイム性とスケーラビリティを重視して、クラスタリングは、AD 変換値の送信粒度を輝度として捉えた触覚変化画像に対するラベリング処理により実現している。

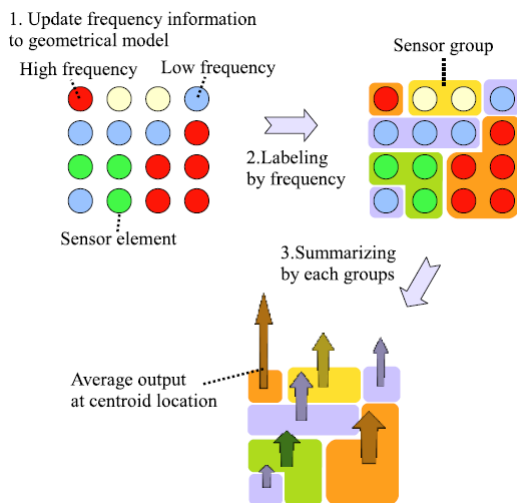


図5:センサ値変化速度に基づくオンライン時空間粗密構造化アルゴリズム

(4) 身体負荷に対する並列監視評価構造を備えた行動システムの構築

全身のセンサ情報を、瞬間的な「痛覚」と時定数を伴う「疲労」という二つの観点から評価することで身体負荷を低減する自律馴染み反応を通常のタスク動作のバックグラウンドで実行される並列監視評価構造を用いて構築する手法を明らかにした。小型ヒューマノイドロボットにおける実装例では、各関節を駆動するモータに流れる瞬間的な電流値から「痛覚」を、各モータの温度変化から「疲労」を計算し、タスク実行を行うシステムとは並列に動作するプロセスにて現時点での「痛覚」「疲労」に基づき関節サーボゲインを調節する機構とした。

(5) 柔軟密着タスクと身体負荷低減のための馴染み作用の同時実行を実現する行動学習システムの構築

分布した3次元柔軟変形触覚センサの力変化の概略記憶に基づいたフィードバック制御として、現在のセンサ出力との差分に対して、対応する関節のヤコビアンを逐次的に計算することで力変化の記憶を辿る柔軟密着タスクの行動学習手法を明らかにした(図6)。また、学習後の行動実現の際に、更に、

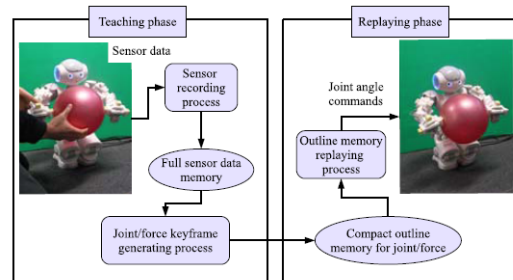


図6:多軸触覚センサ変化の概略記憶に基づく物体密着行動の学習

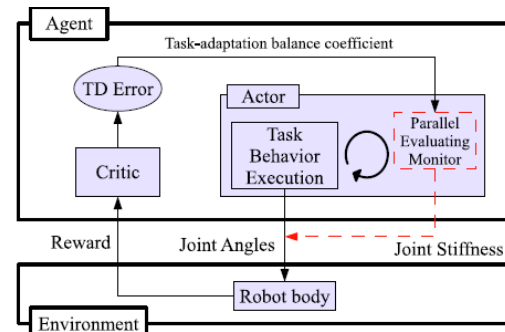


図7:タスク達成度と疲労・痛覚の同時逐次的評価による自律馴染み機能の調節学習システム

タスク実現度と上記(4)の身体疲労, 痛覚の双方を逐次的に評価することで, 身体負荷低減馴染み反応の作用を自律的に調節する学習系を強化学習の一手法である Actor-critic のフレームワークを拡張することで構築する方法を明らかにした(図7).

これらの成果により, 本研究課題の目的の本質的な部分は達成することができたといえる. 今後の展望としては, 人型に限定せず多様な形態のロボットにおいて, 多軸柔軟触覚センサを分布させた柔軟肉質センサ外装とそれを用いた密着馴染み行動学習手法を適用していくことで全身で人や物に接触し馴染むことの必要な実アプリケーションへ応用していくことが重要であると考えている.

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2件)

- ① 吉海智晃, 福島寛子, 小林一也, 稲葉雅幸, “対人インタラクションのための伸縮可能な被覆型柔軟ニットセンサ外装の開発”, 日本ロボット学会誌, 査読有り, 30巻5号, 2012年(採録決定済, 30巻5号に掲載予定)
- ② 吉海智晃, 林摩梨花, 水内郁夫, 稲葉雅幸, “並列監視評価構造を備えたヒューマノイドの自律行動統合システム”, 日本ロボット学会誌, 査読有り, 28巻1号, p. 85-94, 2009年

[学会発表] (計7件)

- ① 吉海智晃, 小林一也, 稲葉雅幸, “分布触覚情報の状態変化速度に基づくオンライン時空間粗密構造化の実現”, 第12回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2011年12月25日, 京都
- ② 辻純平, 秋元貴博, 吉海智晃, 稲葉雅幸, “協調行動学習による複数ヒューマノイドの段差登り動作の実現”, 第12回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2011年12月25日, 京都
- ③ 熊谷伊織, 野沢峻一, 垣内洋平, 吉海智晃, 岡田慧, 稲葉雅幸, “環境接触行動ヒューマノイドのための柔軟変形多軸触覚センサを用いた全身分散配置被覆外装の実現”, 第12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, 2011年12月23日, 京都
- ④ Tomoaki Yoshikai, Kazuya Kobayashi, Masayuki Inaba, “Spatial and Temporal Coarse to Fine Structuring Method of Distributed Tactile Sensors Based on

Changing Velocity of the Sensation”, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2011年12月9日, PhuketIsland, Thailand

- ⑤ Tomoaki Yoshikai, Kazuya Kobayashi, Masayuki Inaba, “Development of 4-axis Soft Deformable Sensor for Humanoid Sensor Flesh”, 11th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2011年10月27日, Bled, Slovenia
- ⑥ 秋元貴博, 小林一也, 植木竜佑, 小島光晴, 吉海智晃, 稲葉雅幸, 常駐型対人対応のための超短時間充電キャパシタ搭載自律移動ロボットの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2010年6月16日, 旭川
- ⑦ 小林一也, 吉海智晃, 後藤健文, 秋元貴博, 伊沢多聞, 稲葉雅幸, “多層発泡成形による局所柔軟性分布を持つ超厚肉柔軟ロボット外装の実現”, 2010年6月16日, 旭川
- ⑧ Tomoaki Yoshikai, Hiroko Fukushima, Marika Hayashi, Masayuki Inaba, “Development of Soft Stretchable Knit Sensor for Humanoids’ Whole-body Tactile Sensibility”, 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2009年12月9日, Paris, France
- ⑨ Tomoaki Yoshikai and Marika Hayashi and Asuka Kadowaki and Takefumi Goto and Masayuki Inaba, “Design and Development of a Humanoid with Soft 3D-Deformable Sensor Flesh and Automatic Recoverable Mechanical Overload Protection Mechanism”, 2009年10月14日, St.Louis, USA
- ⑩ 吉海智晃, 稲葉雅幸, “姿勢変化を直接計測可能な4軸柔軟変形センサユニットの開発”, 第27回日本ロボット学会学術講演会, 2009年9月17日, 横浜

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉海智晃 (YOSHIKAI TOMOAKI)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任講師

研究者番号: 60436558