

機関番号：32689

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2007～2010

課題番号：19206028

研究課題名（和文）人間共存ロボットの人間追従制御手法に関する研究

研究課題名（英文）Research on the Following Motion Control Method for Human Symbiotic Robots

研究代表者

菅野 重樹（SUGANO SHIGEKI）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00187634

研究成果の概要（和文）：作業中の人間共存ロボットに人が接触した場合においても、接触を認知し、周囲環境との衝突を避けつつ接触を受け流すと同時に、作業を遂行することが可能となる人間追従システムを構築した。

研究成果の概要（英文）：We constructed the robot system to follow the human contact with low contact force, which was a combination of passive mechanisms (collision safety skin and passive joint), quantification module of contact state and whole-body motion control.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	10,700,000	3,210,000	13,910,000
2008年度	9,400,000	2,820,000	12,220,000
2009年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2010年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
年度			
総計	35,300,000	10,590,000	45,890,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，知能機械学・機械システム

キーワード：ロボティクス

1. 研究開始当初の背景

産業用ロボットなど、これまで実用化されたロボットは、安全上の理由から人間と接触・衝突しないように人間の作業空間と完全に分離されていた。それに対して、福祉やサービス分野において人間と作業空間を共有し人間を直接サポートする「人間共存ロボット」は、直接的に人間と接触しつつも、安全であると同時にある程度の大きさのパワーを発生して人間を支援できる機能を備えていなければならない。そのためには、ロボットはまず全身で起こり得る人間との接触あるいは衝突を検知し、その触れ合いがどのような意味あるいは意図により起きたのかを認識できなければならない。

2. 研究の目的

人間共存ロボットに必要となる研究課題は数多く存在するが、上記の背景から、環境との接触部位となるロボット表面カバーの設計、および接触情報に基づく環境適応のための認知・制御方法の確立が特に大きく注目されている。しかし、ロボット表面カバーの設計とカバーの特性を活かした認知処理手法とを総合的に捉えたシステムインテグレーションについては、これまで深く検討された例がほとんどなかった。その背景には、カバーといっても、その形状、センサの種類・数・性能など、設計に関するパラメータがきわめて多く、その情報処理手法も様々であり、ロボットを実現しようとしたときに、どうし

でも個別対応の設計・制御になってしまっていたことが指摘できる。そのために、人間を含む環境との接触状態の体系的な整理と、それに基づく設計の規範導出、汎用性のある制御システムの構築が求められている。

そこで本研究では、実際に人間とロボットとのさまざまな触れ合い状況を分析・解析し、接触・衝突認知に必要となる情報の抽出とその検出が可能なロボット用表面カバーを構築することで、人間と安全な協調作業を実現できる人間共存ロボットの接触認知システムの設計論を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

人との接触はロボットが何もしていないときに起きるとは限らない。例えば、運搬作業中のために机上の対象物に手を伸ばしている際に人に接触されたとする。このときロボットは接触に追従すると同時に、作業を遂行しかつ自己を含む周囲環境との接触を回避するという複数機能を両立する必要がある。そこで人間に追従するための柔軟なロボット身体へのデザイン及び触覚・力覚情報から接触状況を判別する認知に加え、複数機能を両立する全身協調制御を統合し、人間追従システムを構築した。システムの全体像を図1に示す。

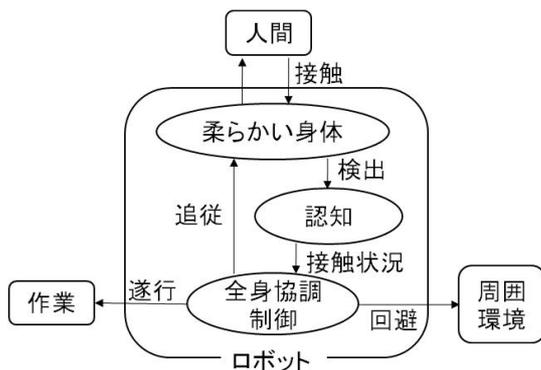


図1. 人間追従システム全体像

ロボットの外装カバーを含む身体デザインは、人間-ロボット間に生じる接触におけるインターフェースとして直接的に影響を与える。よって(1)衝突安全被覆と受動柔軟関節の2重の柔らかさを備えたロボット腕部を設計し、衝突安全性と追従性の2つを満たすことを考える。ロボットに入力された接触は、センサにより検出されたのちに、(2)力覚・触覚センサ情報を接触状況として認知する機能が必要となる。人間に追従するための基盤技術である(1)(2)について、個別に性能を評価・検証する。(3)ロボット全身の協調動作を生成する制御手法については多様な状況に対応しうる汎用的な枠組みを構築した。メカ・認知・制御がインテグレートされたシステムにより、複数機能両立にチャレ

ンジし、その有効性を検証する。

4. 研究成果

(1) 柔らかいロボット身体への設計

人間共存ロボットは、衝撃吸収性の高い粘弾性被覆と外力追従性に優れた受動柔軟関節を備えておく必要がある。この考えをロボット全身設計に応用するためには、安全性の低下を招く体格・重量の増大を避けつつ設計を進める新たな方法が必要となる。そこで本研究では、外力追従性と衝突安全性を確保しつつ、小型軽量化を達成可能な衝突安全被覆と受動柔軟関節の実践的な設計手法を導出した。

(a) 衝突安全被覆設計

衝突安全被覆設計ではまず、頭部傷害基準HICと傷害発生確率の関係を表すリスクカーブに着目し、AIS2(骨折等)の傷害発生確率を5[%]以下とする新たな安全基準を設定した。次に、粘弾性素材の選出ならびにアーム部位ごとの最薄被覆設計を行うために、加速度センサを内蔵した頭部インパクトと1自由度受動柔軟関節アームを用いて衝突実験を実施し、被覆の種類・厚さや各種衝突パラメータとHICとの関係性を明らかにした。図2はロボット腕部の各部位にTaica社のHigh Dampingゲルを装着した場合の、傷害発生確率を示す。ここで得られた対応データとリスクカーブを照合し、等身大ヒューマノイドを

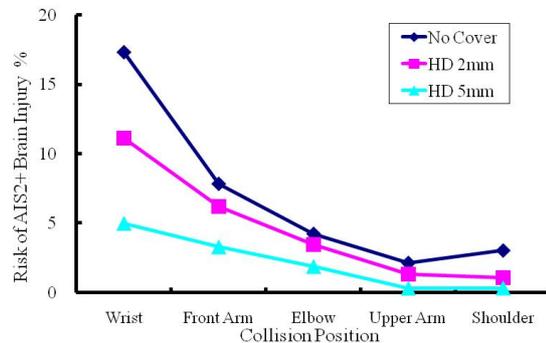


図2. HDゲル装着時の部位ごと(ロボット腕)の傷害発生確率

想定した安全被覆設計を行った結果、HDゲルであれば部位によらず5[mm]以下の被覆で安全基準を満足できることが確認された。

(b) 小型受動柔軟関節設計

受動柔軟関節の小型設計に関しては、受動機構の小型化と追従性・制振性のトレードオフ問題を解決するため、バネ定数-最大ねじり変位平面上でバランス設計する手法を案出した。また、機械粘性・弾性によらず良好な人間への追従性および振動抑制を達成可能な位置制御器ベースの追従・制振制御系を新たに構築し、柔軟関節試験機を用いて人間追従実験で評価を行った。その結果、小型化

のために最大ねじり変位に制約を設けた低機械弾性でも、長寿社会対応ドアの開閉力より小さな力で操作できる程の良好な追従性が達成できること、ならびに $\zeta=0.1$ 程度の低機械粘性でも振動抑制、が可能であることが示され、本手法の有用性が確認された。

(2) 触覚認知するための基本スキーム

ロボット身体各部における接触状態分析・解析ならびに、試作機へのインプリメントを行うことを目的とし、具体的には、ロボット身体の様々な部位で生じ得る人間との接触を人間とほぼ同等に触覚認知するための基本スキームの構築および、身体の形状等に応じて差異が生じ得る接触状態の認知精度の定量化に成功した。

ここでは、人間と共存するロボットの接触認知を人工的に再現するにあたり、同一の接触に対してロボットが人間と同一の状況識別結果を出力できればよいとする方針を採用することとした。この考え方を体現するべく、まず、自然言語（接触表現語）による接触状況の表象言語化を行った。接触表現語は情報取得のための状況設定手段として、また、状況識別結果の出力手段として利用される。次に、接触状況識別に足る有用な触覚情報の特徴量を選定した。その上で、各表現語に相当する接触現象で検出される多次元触覚情報の特徴パターンを自己組織化処理し、人間の接触認知の曖昧さの学習も含め、受け手の接触認知結果（接触表現語）と触覚情報の物理的な対応付けを行った。図3に各接触表現語に対応する競合層上のニューロンの発火状態を示す。模様が似ているか否かが混同のしやすさを示すため、例えば⑩引っ掻くは⑥つかむと区別しやすいが、⑨こすると混同しやすいことが直観的にわかる。このとき、条件設定に応じて変動し得る接触認知性能を一元的に定量評価するために導入した定量化指標（混同行列を用いた混同しやすさの評価指標）に基づき、触覚センサ仕様や情報処

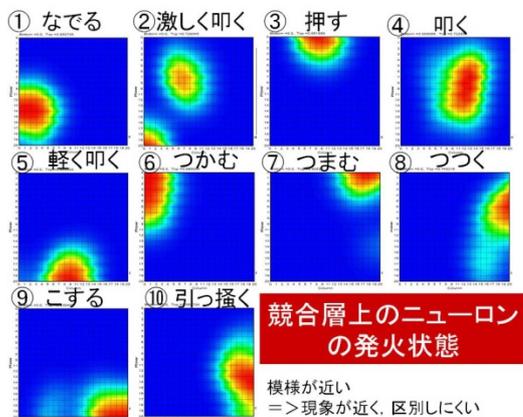


図3. SOMにより自己組織化された接触特徴量

→ ロボット平均認知率

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
↓ 1.stroke	81	9	0	2	3	5	0	0	1	0
2.beat	9	63	4	15	7	2	0	0	0	0
人 3.push	0	3	85	5	0	2	6	0	0	0
間 4.hit	2	14	7	56	6	1	5	4	2	3
の 5.tap	2	7	0	4	77	0	0	1	9	0
認 6.grasp	7	3	4	1	0	85	0	0	0	0
知 7.pinch	0	0	7	4	0	0	75	7	1	6
果 8.poke	0	0	0	3	1	0	6	59	7	24
9.scrape	1	0	0	1	13	0	1	7	52	25
10.scratch	0	0	0	2	0	0	5	24	25	44

図4. 混同行列による評価

理パラメータを設計する方法を案出した。図4に混同行列による評価を示す。触れられた人間が⑩scratchと感じる接触に対して、ロボットは⑩が44%と最も高い数値を示しているものの、⑨scrape25%、⑧poke24%と2つのついて感じる割合が高いことが分かり、認知結果を混同しやすくなるのが定量的に確認できる。以上により、受け手の『触れられ方』認知を学習させた上で、SOMの視覚的な評価をはじめ、混同行列に基づく定量的な評価を行い、提案する接触認知の基本スキームの有用性を確認した。

(3) 全身協調制御手法

人間共存ロボットは、人間との接触に対応すると同時に周囲環境との接触を避けながら、指示された作業を遂行しなければならない。提案する全身協調制御手法は、人間追従・作業遂行・環境回避の三つの主要機能を全てカベクトルとして統一的に記述し機能統合することによって、順問題的に全身運動を生成可能とする。これまでの逆運動学ベースの解法では、様々な状況に対応するために個別に制御則を用意する必要があったが、本手法では簡単なパラメータ調整のみで対応可能である。

また、手先を目標位置に到達させるリーチング作業において初期位置と目標位置の間に障害物が存在する場合などには、回り込む動作が必要になるが、単純にカベクトルを重ね合わせるだけでは、カベクトル同士が相殺しデッドロック状態に陥るといった問題がある。そこで、作業遂行と環境回避によるカベクトル場の先行的生成を導入し、これを解決した。

実機実験の結果を図5に示す。ロボットは初期位置Aから目標位置Cにリーチングするが、直線軌道上には障害物がある。図中の各軌道は、3種類の条件下で行った実験結果に相当する：①淡青色：単純なカベクトルの重ね合わせ手法適用時；②青色：先行的カベクトル場生成適用時；③赤色：先行的カベクトル場生成適用+接触発生による人間追従。

①では、目標位置に直進しているものの、

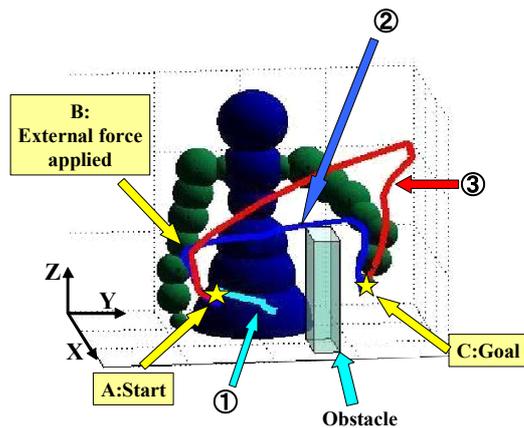


図5. 作業遂行・環境回避・人間追従の両立実験

障害物の手前でデッドロック状態に陥り未到達に終わる。それに対し、先行的力ベクトル場生成を適用した②と③においては、初めから障害物を回り込む軌道が生成され、最終的に目標位置に到達できていることが分かる。なお、③の実験ではロボット動作中に、ロボットと障害物の間を紙面左から右に人間がロボットアームと接触しつつ通過する状況を発生させた。外力に追従し目標位置を行き過ぎた後（接触解消後）、目標位置に到達する手先軌道を描いていることがわかる。手先初期位置と目標位置の間で障害物が直線軌道を遮蔽する状況においても、障害物を回避でき、かつ人間追従をしつつ作業遂行可能であることが示された。

(4)まとめと今後の展望

本研究においては、コンパクトなロボット身体でメカの柔らかさを生かした高度な衝突安全性と人間追従性を再現可能とし、触覚・力覚情報の接触状況としての認知に成功するとともに、全身協調制御により作業中という複雑な条件下での人間追従を実ロボットで実現している。

開発した人間との安全な接触を実現するための基盤技術は、本研究ではあくまで人間からの接触への追従つまり受動的な対応に限定して適用している。今後の展望としては、接触を計画する制御モジュールを開発しシステムの上位に搭載することで、ロボットから人間に対して能動的に触れていく、より積極的な接触を実現することを目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計10件)

① T. SUGAIWA, H. IWATA and S. SUGANO, “Shock Absorbing Skin Design for Human Symbiotic Robot at the Worst Case Collision,” Proceeding of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 査読有, pp. 481-486, 2008.

② T. SUGAIWA, H. IWATA, and S. SUGANO, “New Visco-Elastic Mechanism Design for Flexible Joint Manipulator,” Proceeding of IEEE-ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 査読有, pp. 235-240, 2008.

③ H. IWATA and S. SUGANO, “Whole-body Coordinated Control for Task Execution and Human Following,” Proceeding of CISM-IFTOMM Symposium on the Theory and Practice of Robots and Manipulators, 査読有, pp. 209-216, 2008.

〔学会発表〕(計17件)

① 菅野重樹ほか, “人間共存ロボットの躯体適応行動 ～第26報: 作業拘束の段階的解除による人間追従性と作業性の両立手法～”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2009年5月, 福岡.

② 菅野重樹ほか, “小型・軽量の柔軟関節マニピュレータのための粘弾性機構設計”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2008年6月, 長野.

③ 菅野重樹ほか, “リスクカーブに基づく衝突安全被覆設計”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2008年6月, 長野.

〔図書〕(計1件)

菅野重樹ほか, “人間共存ロボット TWENDY-ONE ～汎用生活支援ツールとしての可能性”, 福祉介護機器 Techno+, vol. 1, no. 9, pp. 17-22, 2008年9月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅野重樹 (SUGANO SHIGEKI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号: 00187634