

## 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 15 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20300072

研究課題名（和文） 衝撃力を受ける人間型ロボットの反動零空間法に基づくリアクション・バランス回復制御

研究課題名（英文） Reaction Null Space Method Based Reaction and Balance Control of a Humanoid Robot Subjected to External Impact

研究代表者

Dragomir Nenchev（ドゥラゴミル ネンチェフ）

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号：80270809

研究成果の概要（和文）：本研究では、直立時の人間型ロボットの体のさまざまな部位に加わる衝撃的または継続的な外力に対する反動・姿勢維持制御を保證する、人間型ロボットのための反動零空間法に基づくバランス制御コントローラを開発した。研究では、まず矢状面内で加わる継続的な外力の大きさに応じて滑らかなバランス制御の遷移が実現される ankle-hip 動作戦略の統合、次にモーションキャプチャを用いて人間の前額面内の外力への姿勢維持動作を解析し、生物力学分野では未報告の frontal-plane ankle、lift leg、cross-leg step、side step の四つの反動作戦略パターンを同定、frontal-plane ankle と lift leg 動作戦略を統合した。また、これらを実験機 HOAP-2 による動作制御実験で検証し、さらに、矢状面・前額面からずれた外力への反動・姿勢維持（out-of-plane パターン）を動力学シミュレーションで確認した。

研究成果の概要（英文）：A balance controller for humanoid robots based on the Reaction Null Space method was developed. The controller ensures reaction/balance recovery control to external impacts and to continuous forces on various body parts while standing upright. First, the ankle and hip strategy in the sagittal plane have been integrated such that smooth transition between these strategies is realized, depending on the magnitude of the continuous external force. Second, we used motion capture data to analyze human responses to external forces in the frontal plane. We have identified four reaction patterns, not all of them yet reported in the biomechanics literature: frontal-plane ankle strategy, lift leg strategy, cross-leg step strategy and side step strategy. The frontal-plane ankle strategy and the lift leg strategy have been integrated with a smooth transition between them and applied successfully to a small humanoid robot HOAP-2. Third, we have applied the controller to ensure reaction/balance recovery with external forces with offset from the sagittal and frontal planes (out-of-plane patterns). This reaction pattern has been confirmed via simulations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	11,800,000	3,540,000	15,340,000
2009 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	15,200,000	4,560,000	19,760,000

研究分野：ロボット工学

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：衝撃力、人間型ロボット、リアクション、バランス回復、反動零空間法

## 1. 研究開始当初の背景

人間型ロボットは、人間とともに同一の環境下で活動することが望まれるため、その活動を安全に実現しなければならず、特別な注意を払わなければならないのだが、この大きな問題に対して十分な研究がなされていなかった。人間型ロボットの安全性を議論するためには、産業技術総合研究所（以下、産総研）藤原らのようにロボットが転倒した場合に自体の損傷を回避する手法を問題とすることも重要だが、それ以前に転倒そのものを抑制する必要があり、安全性問題はバランス制御と密接に関わっている。

産総研梶田ら、東京大学杉原・中村、井上らなど多数の研究者は、ZMP 規範歩行パターンを生成し、規則的な歩行周期でのバランス制御を実現し、産総研原田らは、環境内の適した静対象物を把持することでバランス制御を改善することや、物体を抱え上げる際のバランス制御を実現していた。また、環境内の予期せぬ変化を考慮したバランス制御研究、たとえば、傾斜が変化する状態においても正しい姿勢を維持する研究、不整地上での歩行制御研究、不意に障害物が現れロボットが停止しなければならない状況でのバランス制御などが挙げられた。

さらに、ロボットが直立時に予期せぬ衝撃力を受ける場合に、速やかにバランスを制御する研究例もあった。このような衝撃力は人間や周囲の対象物との偶発的な衝突が原因であり、Univ. Paris Sud の P. Gorce はシンプレックス法に基づく最適化機能を有した Coordinator レベルを含む階層的制御構造を用いた研究を行い、生体力学や理学療法分野においては、同様な状況においてバランスを回復する実際の人間の身体反応について広範囲な調査が行われ、その結果、ankle および hip と呼ばれる衝撃に対する二つの特徴的な身体運動パターンが確認されていた。

Oregon Health&Science Univ. の F.B. Horak は、その身体運動パターンに基づくことで異なる姿勢運動が連続に合成可能なことを示し、ankle と hip、二つの動作戦略を二足歩行ロボットに適用したシミュレーションを行い、LIRMM INRIA の Azevedo、Poignet、Espiau は、二次計画法を用いて7関節の平面二足歩行ロボットのための姿勢制御を実現し、Honda Res. Inst. の Abdallah と Goswami はバランス回復の二段階の戦略を提案、平面4リンクの二足歩行ロボットに適用した。

しかし、上記の研究成果では、人間に見られるような自然な動作によるバランス回復運動はまったく考えられず、ひざ関節が逆方向に折れ曲がるなど不自然な運動となることがあり、さらにこれらの研究の重大な問題点として、姿勢間の遷移動作を考慮していない

ことが明らかになっていた。

我々は、本研究の開始時点において、反動零空間法を適用した hip 動作戦略を実現し、小型人間型ロボットを用いた実時間制御実験も成功していた。また ankle 動作戦略も実現し、さらに、加速度センサからの得られる衝撃力の情報に従って ankle または hip の動作戦略を選択し、回復動作を実行するセンサベースの人間型ロボットシステムの開発および制御実験を行っていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、人間型ロボットが人間と共存する社会環境において本格的に活動する際に起こるさまざまな予期せぬ衝撃に対して、ロボットが自律的に柔軟な回避行動を取り、その安全性を維持することを目的とした。本研究の核となったロボット技術は、研究代表者が宇宙ロボット研究において独自開発してきた衝撃力を扱う反動零空間法である。予期せぬ衝撃に対して実際に人間が行う回復動作を体系化し、その動作戦略と反動零空間法を融合することによって、新しいリアクション・バランス回復制御法を導き、動力学シミュレーションと実機実験によって、その制御則を適用した人間型ロボットを開発、その安全性を実証することに取り組んだ。

## 3. 研究の方法

人間型ロボットが、予期せぬ外乱である外部からのさまざまな種類の衝撃力に対して、リアクションおよびバランスを制御するための制御コントローラを実現するために、我々が研究期間内に進めた計画は以下のとおりである。

- (1) ロボット制御コントローラは、宇宙ロボット用に研究開発を行ってきた反動零空間法を基本とし、人間型ロボット用に適合する形へ改良して開発する。
- (2) 直立静止時の人間型ロボットのさまざまな部位に外部から衝撃力を作用させ、その際に受けるリアクションを回避し、身体のバランスを回復する動作生成手法と制御則を開発する。

- ① 鉛直方向のモーメントが発生しない上半身中央への衝撃力に対する研究課題：理学療法分野の知見に基づく step 動作戦略の人間型ロボットへの適用と制御方法の開発と、事前実証してきた ankle-hip 動作戦略を融合するための動作戦略間の円滑な動作遷移法を開発と、それに基づく新たなリアクション制御パターンの生成（図1参照）。
- ② 鉛直方向のモーメントが発生する上半身へのオフセット衝撃力に対

する研究課題：先行研究成果のないオフセット衝撃力への実際の人間の回復運動をモーションキャプチャシステムによって計測し、その動作を解析する。そして、同条件下における反動零空間法に基づくリアクション・バランス回復制御則を適用した人間型ロボットの動作実験結果と、上記で得られた人間の解析データを評価する（図2参照）。さらに、モーションキャプチャより取得された人間の計測データを基に、腕の運動を伴ったリアクション・バランス回復制御法へと拡張する。

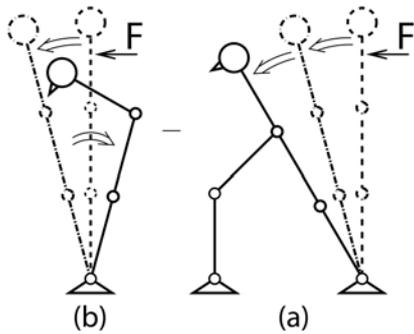


図 1：鉛直方向に外力からのモーメント

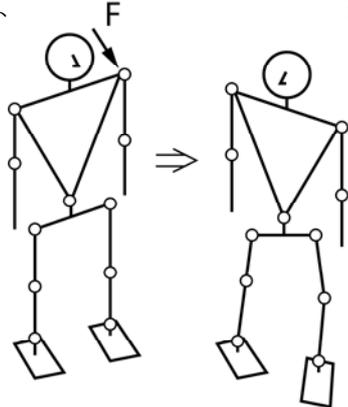


図 2：オフセット衝撃力を受ける場合の姿勢維持動作

- (3) 歩行は伴わないが上半身や手足の身体内部での運動が起こる場合の、外部衝撃力へのリアクション・バランス回復制御を研究する。
- (4) 歩行を伴う全身運動時に外乱を受ける場合のリアクション・バランス回復制御を研究する。
  - ① スリップやスライディング時のリアクション制御動作を生成する。
  - ② 小さな障害物や角運動量を伴う外乱に対するリアクション回復制御動作を生成する。
- (5) (1)～(4)の研究過程と結果から、リアクション・バランス回復制御法を体系し、提案する制御法に基づいて、必要とされ

るアクチュエータ、センサ、身体自由度などを考慮した人間型ロボットシステムの設計開発手法へ発展させる。

#### 4. 研究成果

平成 20 年度は、Step 動作戦略を実現する動作パターン、ankle-hip-step 三つの動作戦略に基づく遷移動作パターンの 2 種類のリアクション・バランス回復パターンを生成し、直立静止時状態の人間型ロボットに対して背面から上半身中央に衝撃力が作用した場合の動力学シミュレーション実験を行った。また、実時間センサベースのリアクション動作パターンを開発、これを富士通オートメーション社製小型人間型ロボット HOAP-2 に適用し、図 3 に示すように、実機実験によってその制御則の有効性を確認した。衝撃力の認識には、足裏圧力センサからの ZMP 情報と加速度センサデータを融合し用いた。

これらの研究成果は、査読付き国際会議 1 件（学会発表文献⑧）、国内講演会 2 件（学会発表文献⑦、⑨）の発表につながった。

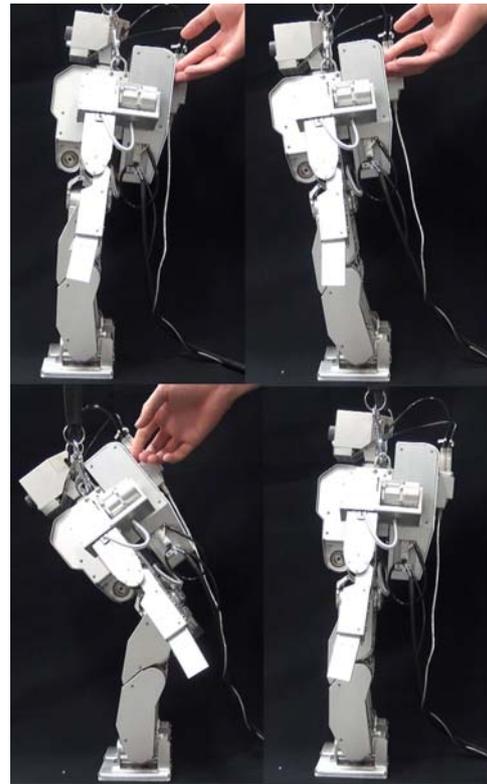


図 3：Ankle-hip 動作戦略に基づいた衝撃力に対する HOAP-2 のバランス制御動作

平成 21 年度は、モーションキャプチャシステムを用いた実際の人間のリアクション・バランス回復動作の計測・解析から、生体力学分野などの従来研究では考慮されていなかった、新たなリアクションパターンの創出と、それに基づいた人間型ロボットでの自然な

回復動作の生成、制御法による実証試験を行い、それらの結果から人間型ロボットのシステム設計・開発手法を提案する基本理論をまとめた。図4に示すように、人間の前額面(矢状面に垂直で体を前部・後部に分ける平面)内の外力への姿勢維持動作の解析結果より、frontal-plane ankle、lift leg、cross-leg step、side step の四つの新たな動作戦略を同定した。

また、前年度までに開発した動作パターンに対して、人間型ロボットの持つ大きな特徴である身体の動力学的冗長性を活用した新たな二つの動作パターン：

- (1) ankle および hip 動作戦略においてひざ関節の利用を考慮する動作パターン
- (2) 開発してきたすべての動作パターンに対して腕の運動の利用を考慮する動作パターン

の生成を検討し、動力学シミュレーションと実機試験に取り組んだ。さらに、前年度の研究結果をさらに改善して、国内講演会1件(学会発表文献⑥)の発表へつなげた。

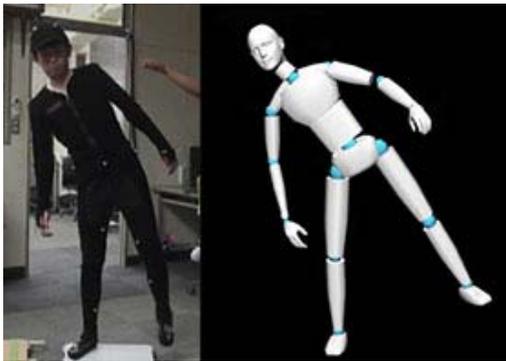


図4：モーションキャプチャシステムを用いた実際の人間の姿勢維持動作計測実験

平成22年度は、前額面内で衝撃力が作用する場合における、以下の三つのリアクション・バランス回復動作パターンを生成し、実機によりその動作を実現した。

- (1) Frontal-plane ankle strategy (図5参照)
- (2) Lift leg strategy
- (3) Side step strategy

これにより、矢状面・前額面それぞれにおけるリアクション・バランス回復動作パターンが生成された。

また、衝撃力が身体中央に作用しない、重心に対してオフセットを持ち鉛直軸周りのモーメントが発生する条件下でのリアクション・バランス回復動作パターンを生成するため、モーションキャプチャシステムを用いて、外部衝撃力に対して実際の人間がとる回復運動を計測し、解析を行った。この結果、

- (1) 腰部において鉛直軸周りの回転動作パターン

- (2) 腰部における鉛直軸周りの回転運動と、足首関節での運動が合成されたリアクション動作パターン
- (3) 腰部における鉛直軸周りの回転運動と臀部での運動が合成されたリアクション動作パターン
- (4) 腰部における鉛直軸周りの回転運動とステップによる運動が合成されたリアクション動作パターン

の四つの動作が新たに同定できた。

以上の研究成果は、雑誌論文1件、査読付き国際会議1件(学科発表文献④)、国内講演会1件(学会発表文献⑤)につながった。

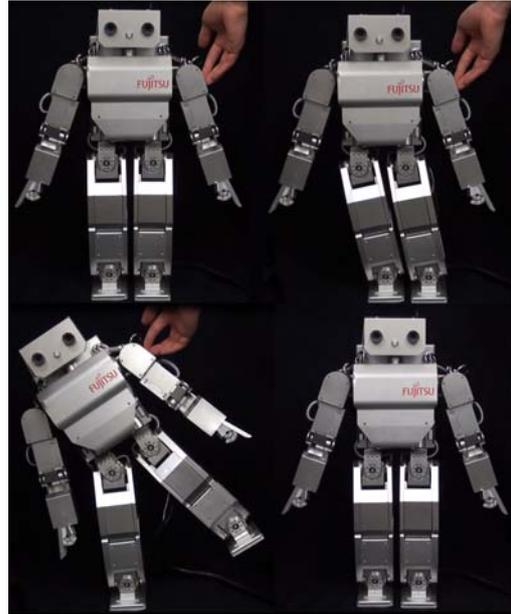


図5：Frontal-plane ankle strategy に基づく姿勢維持動作を行う HOAP-2

平成23年度は、ここまで得られたリアクション・バランス回復に関する理論、動力学シミュレーション、制御システムの三つを、以下の二つの実験環境・条件下で応用し、人間型ロボットによるより実用的な全身運動生成を達成した。

- (1) 全身運動中に予期せぬ衝撃力を受ける場合のリアクション・バランス回復制御動作を生成することを目的とし、上半身、特に肩に衝撃力を受ける条件において、人間がどのように姿勢維持をしているかをモーションキャプチャにより解析し、上半身をひねる反動動作をこのような衝撃力に対する特徴的な回避運動としてロボットのバランス制御に取り入れ、動力学シミュレーションにより評価した(図6参照)。
- (2) 人間型ロボットが歩行時に予期せぬ衝撃力を受ける場合のリアクション・バランス回復制御動作を生成した。この条件下ではバランスを回復するために衝撃力作用方向へのステップ動作によるバ

ランス回復運動が必要となり、一連のロボットのバランス維持動作制御を、開発してきた動力学シミュレータ上で評価した。

これらの姿勢維持動作についても先行研究例はなく、モーションキャプチャシステムを利用した実際の人間の運動解析を実施し、取得した解析データから、リアクション動作パターンをモデル化、人型ロボットのリアクション・バランス回復制御を実現した。これらの研究成果は、査読付き国際会議2件（学会発表文献①、②）、国内講演会1件（学会発表文献③）となった。

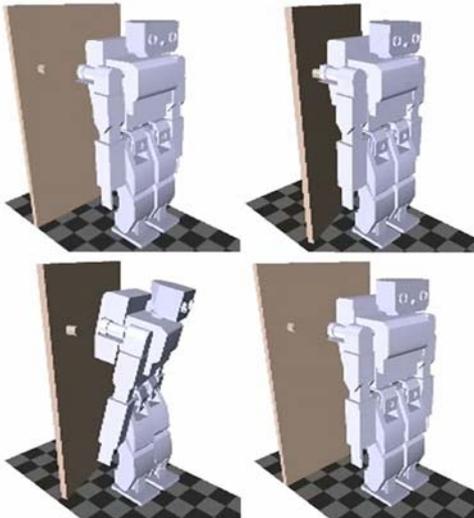


図6：肩に衝撃力を受ける条件における人間が取る上半身をひねる反動動作取り入れた人間型ロボットのバランス制御の動力学シミュレーション

本研究成果を総括すると、これまで人間と同一環境内で活動するロボットに対して安全性を議論する研究は多く見られたが、徹底的な問題解決を図る研究成果はほとんどなかった。しかし、本研究の成果により、論理的に厳密な基準と体系的に問題を取り扱う方法の基本的な部分を提案できたと考える。また、独自に開発してきた宇宙ロボットのための反動零空間法を応用し、新たな人間型ロボットへ用制御法を開発してきたことは、他の研究にはない独創的なものである。ただし、本研究申請時に掲げたすべての目標は期間内に達成することがかなわなかった。これらを完成させるため、我々は本研究課題を継続する。具体的には、現時点までに開発したすべての動作戦略を滑らかな遷移動作とともに統合し、さらに矢状面・前額面・これらの面外における step 動作戦略の統合、人型ロボットの全身動作時や歩行時における反動・姿勢維持動作の開発に取り組む。そして、人間型ロボットやその他のロボットの安全性を解決するだけでなく、実際の人間

のリアクションパターンが体系化され、それらの成果がロボット工学、生体力学、理学療法などのさまざまな分野に貢献することを期待する。

#### 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）

※研究代表者の Dragomir Nenchev（ドゥラゴミル ネンチェフ）は、現在日本国籍を取得し、氏名を金宮好和としており、著者名が2種類あることにご注意いただきたい。

〔雑誌論文〕（計1件）

- ① Dragomir N. Nenchev and Akinori Nishio, Ankle and hip strategies for balance recovery of a biped subjected to an impact, *Robotica*, vol. 26, pp. 643--653, 2008.（査読あり）

〔学会発表〕（計9件）

- ① Yuki Yoshida, Kohei Takeuchi, Daisuke Sato, Dragomir Nenchev, Postural Balance Strategies for Humanoid Robots in Response to Disturbances in the Frontal Plane, Proc. of the 2011 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, Phuket, Thailand, Dec. 7-11, 2011, pp. 1825-1830.（査読あり）
- ② Fuyuki Sato, Tatsuya Nishii, Jun Takahashi, Yuki Yoshida, Masaru Mitsuhashi, Dragomir Nenchev, Experimental Evaluation of a Trajectory/Force Tracking Controller for a Humanoid Robot Cleaning a Vertical Surface, Proc. of the 2011 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, CA, USA, Sep. 25-30, 2011, pp. 3179-3184.（査読あり）
- ③ 吉田祐貴, 竹内孝平, 佐藤大祐, 金宮好和, 前額面内の外乱に対する人間の姿勢運動戦略に基づく人型ロボットのバランス制御, 第29回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 東京, 9月7~9日, 2011, RSJ2011AC1J1-8.
- ④ Yoshikazu Kanamiya, Shun Ota, Daisuke Sato, Ankle and Hip Balance Control Strategies with Transitions, Proc. of the 2010 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Anchorage, Alaska, USA, May 3-8, 2010, pp. 3446-3451.（査読あり）
- ⑤ 佐藤冬樹, 西井達哉, 高橋準, 吉田祐貴, 三橋勝, Petar Kormushev, 金宮好和, HOAP-2によるホワイトボードに書かれた文字を消す作業の実現, 第11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予稿集, 仙台, 12月23～25日, 2010, pp. 426-129.

- ⑥ 太田峻, 岡本和晃, 金宮好和, 佐藤大祐, Ankle および Hip Strategy に基づく人型ロボットの反動動作の遷移手法, 第27回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 神奈川, 9月15～17日, 2009, RSJ2009AC3S3-03.
- ⑦ 岡本和晃, 長尾学, 金宮好和, 佐藤大祐, ZMP を用いた平面上の人型ロボットのコンプライアンス応答制御, 第9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論文集, 岐阜, 12月5～7日, 2008, pp. 1075-1076.
- ⑧ Kazuya Tamegaya, Yoshikazu Kanamiya, Manabu Nagao, Daisuke Sato, Inertia-Coupling Based Balance Control of a Humanoid Robot on Unstable Ground, Proc. of the 2008 8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Daejeon, Korea, Dec. 1-3, 2008, pp. 151-156. (査読あり)
- ⑨ 為ヶ谷和也, 金宮好和, 佐藤大祐, 不整地における人型ロボットのバランス制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'08 講演論文集, 長野, 6月5～7日, no. 08-4, 2008, 2A1-D09.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

Dragomir Nenchev (ドゥラゴミル ネンチェフ)

東京都市大学・工学部・教授  
研究者番号: 80270809

### (2) 研究分担者

佐藤 大祐  
東京都市大学・工学部・講師  
研究者番号: 40344692