

論文の内容の要旨

論文題目 ヒューマノイドによる遠隔作業における全身操縦システムの研究

氏 名 石黒 康裕

本研究はヒューマノイドロボットの全身遠隔操縦による人間の活動範囲拡大や遠隔作業効率の向上を目的とし、従来から自動車・航空機などの操縦システムにおいて評価指標とされてきた「操縦性」「安定性」「操舵反力特性」をヒューマノイド操縦システムに適用し、それらを向上させる二脚動力学アシスト制御機構と搭乗型全身外骨格コックピットを開発・統合し、各種遠隔操縦実験を通してその有効性を示すものである。

第1章「序論」では、研究の背景と目的、論文の構成を述べている。

第2章「ヒューマノイド全身操縦が抱える課題と操縦システムを評価する要素」では、ヒューマノイドロボットが持つ動学的煩雑さから操縦対象として十分に活用できない現状と、同じく複雑な動力学系である自動車や航空機の実用化された操縦システムを照らし合わせることで、ヒューマノイド操縦システムが備えるべき機能や設計思想を議論している。ヒューマノイド操縦の対象を上半身から全身に拡張する際には、運動学に加えて動力学の制約を考慮する必要があることと、将来情報を持たない操縦者の操縦入力とそれら動学的制約条件を両立することが主な課題になることを明らかにしている。

一方で、実用化されている自動車や航空機の操縦システムでは、タイヤ摩擦制御や動翼操作による姿勢制御など、操縦者には困難な複雑で即応性の要する動力学制御は、Drive-By-Wire, Fly-By-Wireと呼ばれる電子制御システムが担うことで、操縦者に負担を強いることなく安全な操縦を可能にしており、ヒューマノイド操縦にも同様の仕組みが必要であることを主張した。また、その評価指標として自動車や航空機でも議論される「操縦性」「安定性」「操舵反力特性」がヒューマノイド操縦インターフェースの議論に適用可能であると述べている。

第3章「ヒューマノイド全身操縦システムの安定性を向上させる二脚動力学アシスト制御」では主に、前述の操縦システム評価指標における「安定性」を向上させる二脚動

力学アシスト制御について述べている。本研究においてヒューマノイドのダイナミクスは簡略化された重心-ZMP系としているが、リアルタイムに入力指令値が更新されていく操縦においては将来情報が利用できないために、動力学拘束条件を考慮した軌道最適化手法が利用できない。そこで将来情報を利用せずとも安定性を保証しつつ、ある程度の重心の動的運動を許可する制約条件を設定する。重心-ZMPモデルにおいてはその重心運動を静定可能な点であるCapture Pointが知られており、由来や導出過程は異なるものの二次元運動を仮定した場合にはDivergent Component of Motion (DCM)と等価である。DCMは現在の重心位置と速度のみから算出でき、このDCMをいかなる脚動作中も両足で形成される予測支持領域に収めるよう重心速度を拘束することで、次の瞬間に遊脚を接地できるという仮定のもと、常に重心運動を静定できることを保証できる。この制約条件下では前方への跳躍や走行などの重心が両足予測支持領域を超えるような動的重心運動は抑制されてしまうものの、その他の立位運動は安全に操縦できるようになる。本研究ではこの着想を軸に、重心の加速条件に対応する Convergent Component of Motion (CCM) による拘束条件や、自動遊脚接地制御をまとめて二脚操縦アシスト制御として提案しており、シミュレーション検証や実機による立位運動実験により「安定性」の向上が実証されている。

第4章「ヒューマノイド全身操縦システムの操縦性と操舵反力特性を向上させる搭乗型全身外骨格コックピットの開発」では操縦システム評価指標における「操縦性」「操舵反力特性」に寄与する物理インターフェースについて述べている。自動車や航空機における操縦性は操縦入力に対する応答性や追従性を指し、操舵反力特性はハンドルや操縦桿を操作した際に感じるフィードバック力のことである。それらをヒューマノイド全身操縦システムに適用した場合、操縦性は操縦者の四肢の指令位置入力に対するヒューマノイドロボットの四肢の追従性、操舵感はヒューマノイドロボットが対象物に触れた際の操作反力のフィードバックと対応付けられる。特にヒューマノイドの全身の操縦性を議論する際は、操縦対象の四肢や重心全てを同時に操縦する際の応答性を指し、従来のジョイスティックや歩行指令コマンドによる切替型の操縦は、全身操縦インターフェースとしての適性に劣る。それらの議論を踏まえ、「操縦性」「操舵反力特性」の観点から搭乗型全身外骨格コックピットを提案し実装している。実際の設計において、97%以上の伝動効率を持つ平歯車やタイミングプーリによる2段減速機構、軽量・高剛性な板金フレーム構造、高負荷関節のモータ強制空冷化などの方策を用いることで、トルクセンサを用いるフィードバックトルク制御に依らないフィードフォワードなトルク制御で、脚用ハプティックデバイスとして十分なバックドライバビリティと足先垂直発揮力470[N]という高推力を確認されている。

第5章「ヒューマノイド全身遠隔作業に適した操舵反力特性を再現する反力提示シス

テム」では、ヒューマノイドの全身操縦を行う操縦者に「操舵反力特性」を提示する、搭乗型全身外骨格コックピットを用いた全身バイラテラル制御について述べている。実際のヒューマノイドロボットシステムは、複雑な体内制御ソフトウェア構成や無線通信を含むネットワーク構成、ロボットリンクの弾性要素などの要因で、バイラテラル制御システムとしての性能が限られており、特に双腕剛体把持などの作業においては内力の振動的挙動が問題となり、これを抑制するために「Task-Oriented」と呼ばれる対象物の幾何形状に基づく拘束条件によってバイラテラル双腕マニピュレーションを安定化する研究もある。本研究の二脚バイラテラル制御部における特殊な「操舵反力特性」も二脚床反力制御に特化した「Task-Oriented」な制御モードであると分類し、実際のバイラテラル全身操縦システムで二脚移動を実現する操舵反力特性について述べている。

第6章「ヒューマノイド全身バイラテラル操縦システムの有効性評価」では、第3章、第4章、第5章、で議論してきたソフトウェア、ハードウェア、ネットワークシステムを統合したシステムによる実作業を想定した各種評価実験について述べている。四肢を同時に駆使する家事作業実験や、未知の段差踏破実験を通して、「操縦性」「操舵反力特性」の有効性を示し、双腕双脚による大型重量物運搬実験を通じて「Task-Oriented」な遠隔操縦モードの有効性を示している。

第7章「結論」では本研究を総括し、結論と今後の展望について述べている。

本論文はヒューマノイドロボットの全身操縦システムにおける作業効率や範囲を向上させるために、「操縦性」「安定性」「操舵反力特性」「Task-Oriented」という概念を取り入れ、実世界で作業パフォーマンスを発揮できるヒューマノイド全身操縦システムの体系的な構成法をまとめ、実際に構築した等身大ヒューマノイドロボットの全身バイラテラル操縦システムによる各種作業実験を通して有効性を示したものである。本研究の成果はヒューマノイド全身操縦によって遂行できる作業の効率や範囲を向上させ、実用度の高いヒューマノイド操縦システムの実現に貢献できる。