

博士論文

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

2019年12月6日提出
指導教員 稲葉 雅幸 教授

東京大学大学院 情報理工学系研究科
知能機械情報学専攻 博士課程
石黒 康裕

目次

第1章	序論	9
1.1	本研究の背景と目的	11
1.2	本論文の構成	12
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	13
2.1	一般的なロボットにおける操縦形態と等身大ヒューマノイドロボット操縦システム特有の課題	15
2.1.1	等身大ヒューマノイドロボット操縦特有の課題	15
2.2	操縦による等身大ヒューマノイドロボットの運動学制御	17
2.2.1	人型の操縦対象における関節角指令とエンドエフェクタ位置指令	17
2.2.2	ヒューマノイド操縦で使用される入力デバイス	19
2.3	操縦による等身大ヒューマノイドロボットの動力学制御	21
2.4	自動車や航空機に見る複雑系の実用的操縦システムとヒューマノイドロボット操縦システムへの応用	21
2.4.1	自動車の各種安全制御	21
2.4.2	航空機の電子制御	23
2.4.3	操縦システムの操縦性, 安定性, 操舵反力特性	24
2.5	本章のまとめ	25
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	27
3.1	はじめに	29
3.2	DCM/CCMに基づく重心速度制限による二脚動力学アシスト	29
3.2.1	前提となる二脚ロボット制御系	29
3.2.2	二脚動力学アシストシステムの制御フロー	31
3.2.3	DCM/CCMによる重心速度制限	32
3.3	自動化された遊脚接地制御	36
3.3.1	強制遊脚接地制御	36
3.3.2	地面との衝突や内力の蓄積を防ぐ対地速度制限	37
3.4	エンドエフェクタ空間と関節空間でロバストな運動学	38
3.4.1	多拘束条件にロバストな逆運動学	38

3.4.2	Spline 補間による関節速度制限を考慮した運動生成	41
3.5	二脚動力学アシストシステムと従来手法に関する議論	47
3.6	二脚動力学アシストシステムの有効性検証	48
3.6.1	動力学シミュレーションによる二脚動力学アシストシステムの有効性 検証	48
3.6.2	マスタ・スレーブ型操縦システム構成	53
3.6.3	二脚動力学アシストによる安全な全身操縦の実現	55
3.7	本章のまとめ	58
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	59
4.1	はじめに	61
4.2	人型全身操縦に適した操縦インターフェース	61
4.2.1	全身用操縦インターフェースにおける操縦性と操舵反力特性	61
4.2.2	良好な操舵反力特性を再現する全身用操縦インターフェースの形態	62
4.2.3	装着型外骨格と搭乗型外骨格	65
4.3	搭乗型全身外骨格コックピット TABLIS の概要	68
4.4	板金フレーム構造設計の活用によるコストと部品点数の削減	71
4.4.1	試作ロボットと板金加工の親和性	71
4.4.2	ロボット用板金設計で使用可能な材質	72
4.4.3	板金フレーム設計における制約	74
4.5	全身用ハプティックデバイスとしての減速機構とモータの選定	76
4.5.1	高バックドライバビリティと高伝動トルクを達成する減速機構の選定	76
4.5.2	高トルクモータの選定	78
4.5.3	下肢外骨格としてのバックドライバビリティの評価	81
4.6	モータ巻線温度の計測と強制空冷化による脚用ハプティックデバイスとして の大出力化	83
4.6.1	モータ巻線温度の計測と強制空冷化	83
4.6.2	モータ強制空冷化による放熱性能評価	86
4.6.3	TABLIS の脚エンドエフェクタの最大発揮力評価	87

4.7	本章のまとめ	89
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	91
5.1	はじめに	93
5.2	バイラテラル操縦システムの構成	93
5.2.1	バイラテラル制御システムにおいて議論される減衰要素	93
5.2.2	基本的なバイラテラル制御構造	94
5.2.3	TABLISのバイラテラル制御システムにおける分類	96
5.3	複雑なロボットシステムと通信遅延に対する対策	96
5.3.1	TABLISにおけるバイラテラル制御ソフトウェアシステム構成	96
5.3.2	実際のネットワークシステム構成時の遅延評価	97
5.4	不安定振動を抑制しつつ接触力を伝える周波数整形	104
5.5	歩行操縦用インターフェースとしての操舵反力提示制御	110
5.6	搭乗型全身外骨格コックピットによる仮想平面上の歩行テスト	111
5.7	歩行操縦用インターフェースとしての操舵反力特性と従来手法に関する議論	115
5.8	本章のまとめ	115
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	117
6.1	搭乗型全身外骨格コックピットによる全身バイラテラル操縦テスト	119
6.2	未知環境形状を知覚可能な脚部の操舵反力特性の検証	126
6.3	通常の双腕バイラテラル制御による双腕双脚物体運搬	130
6.4	大型重量物運搬にTask-Orientedなバイラテラル制御による双腕双脚物体運搬	136
6.5	実際の遠隔作業遂行において必要とされる操舵反力特性	137
第7章	結論	145
7.1	本研究の総括	147
7.2	本研究の成果	148
7.3	本研究の結論	149
7.4	今後の展望	150
	謝辞	151

発表文献	157
参考文献	161

第1章

序論

1.1 本研究の背景と目的

等身大人型ロボット，ヒューマノイドロボットは人間と同様の双腕双脚のリンク構造を持ち，そのリンク剛性や関節出力も等身大の人間を目指して設計されている．それらのヒューマノイドロボットの究極的な目的の一つは，人間の代理身体として人間が普段行う身体的作業を代理実行することである．

特定の作業の自動化を達成するのみであれば，専用設計のロボット機構が性能やコストパフォーマンスの点で最適であるが，あえてヒューマノイドロボットによる代理作業の実現を目指す理由の一つは，人間が行う多種多様な作業を全て包括できるロボットは，究極的にはヒューマノイド型に収束するという展望があるからであろう．この事はしばしば，人間の住環境に適応する為のヒューマノイドロボット，人間の使う道具を使う為のヒューマノイドロボット，として言及される [1]．

また特に，ヒューマノイドロボットを人間の操縦者が直接操縦して活用することに注目すると，その利点は上述のものに限られない．一般の遠隔操縦をテレオペレーション (Tele-Operation) と呼ぶことに対して，特にヒューマノイドロボットを，マスタ・スレーブ制御やバイラテラル制御によって自身の代理身体，アバターとして活用することをテレグジステンス (Tele-Existence)[2] と呼ぶ．日常生活において人間はその双腕双脚の身体構造を同時に駆動して作業を行っており，ロボットを通じて代理作業を遂行する際にそのロボットの身体構造が自身のものとは大きく乖離している場合，対象物に手が届かない，背中が環境と接触する，などの自己身体像との差異に起因するデメリットが発生するが，操縦者身体と同様の身体構造のヒューマノイドロボットであればそのような問題も起きない．また，視覚や音声情報の通信によって操縦者との遠隔コミュニケーションも可能になり [3]，人間の判断能力が求められるようなリモートワークや介護等の分野で期待されている．

このように，代替作業の効率や適用範囲，テレグジステンスにおける親和性を鑑みれば，人間が操縦するロボットの身体構造として最適なものはヒューマノイド型である可能性は十分高いが，一方でヒューマノイドロボットはその身体構造から，実用面において不利な点を多く抱えている．

足平の大きさに対して重心が高いことから，倒立振り子のような不安定な力学的挙動を示し，二足歩行によって移動を行う為には常に外乱の影響を考慮した姿勢制御を必要とすることから，移動ロボットとしては車輪型や四脚型などのロボットに比べて信頼性が劣る．また

上肢に関しても等身大サイズの制約から、可搬重量や位置精度等は一般の産業用ロボットアームに劣る。そのため、双腕型の災害救助用ロボット [4, 5] や建設用重機 [6]、多肢型の医療用ロボット [7] 等の有効性が認められつつありながらも、ヒューマノイドロボットの全身を操縦できる操縦システムは実用化に至っていない。

本来、人間の二脚による移動能力は、双腕による物体操作能力と組み合わせることで、ドアを開けながら通過する、両手で物を持ちながら運搬する、自転車や自動車を運転する、といった全身協調行動として高い作業効果を発揮する。このような全身協調行動を効率的に発揮できるヒューマノイドロボットの操縦システムが実現できれば、これまでのロボット操縦システムに対して大きな作業効率を発揮できるはずである。そこで本研究では、ヒューマノイドロボットの遠隔操縦において、効率的かつ実用的に全身協調行動を実行できるような操縦システムを提案することで、遠隔作業における人間の活動範囲拡大や作業効率の向上を目的とする。

1.2 本論文の構成

本論文は全7章からなる。

第2章では、一般的なロボットの運用形態との比較や、既に実用化されている自動車や航空機の操縦システムからの参考を経て、遠隔作業の実現性を高めるヒューマノイドロボットの全身操縦システムを議論する上で必要な視点を述べ、本研究で開発するヒューマノイド全身操縦システムに求められる必要事項を挙げる。

第3章では、ヒューマノイド全身操縦システムにおいて、操縦者に負担をかける脚ロボット特有の姿勢安定化制御を肩代わりにする、二脚動力学アシスト制御について述べる。

第4章では、力フィードバックによって操縦者に直観的な操舵感や幾何拘束を与えることで、操縦性の向上に寄与する物理インターフェースの設計に関して述べる。

第5章では、操縦者と対象のヒューマノイドロボットの四肢の力覚を相互接続するバイラテラル制御システムについて述べる。

第6章では、ソフトウェアシステム、ハードウェアシステム、バイラテラル制御システムを統合した検証実験を経て、本研究で開発したヒューマノイド全身操縦システムの性能評価を行う。

第7章では、本研究を総括した結論を述べる。

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

2.1 一般的なロボットにおける操縦形態と等身大ヒューマノイドロボット操縦システム特有の課題

2.1.1 等身大ヒューマノイドロボット操縦特有の課題

等身大ヒューマノイドロボットを操縦対象とする場合、その力学的特徴に起因する難点が多く挙げられる。まず、ヒューマノイドロボットであることに起因する特徴として以下が挙げられる。

1. 大自由度系

ヒューマノイドロボットは人間の全身関節自由度を模して、胴体と四肢で30近く、指や首等も含めると40近い関節数を持つ。

2. 劣駆動系

産業用ロボットアームは環境に固定されたシリアルリンク系であるが、移動ロボットはベースリンクが固定されていない浮遊ベースリンク系と説明される。ヒューマノイドロボットを含む脚ロボットは、基本的に環境と接する足裏を介して全身の姿勢制御を行うが、環境との位置関係は直接駆動できない劣駆動系と解釈される。

3. 構造可変系

ヒューマノイドロボット自身の関節リンク構造が着脱等により変化することは少ないが、環境との接触状態が片足支持、両足支持、両手両足の多点接触など多様に変化する。接触点における反力分配を考慮しなければ、想定外の接触状態への変化や、過剰な内力の発生などにより、作業の継続が不可能になる。

4. 非線形システム

基本的に回転型アクチュエータの組み合わせによるシリアルリンク構造であり、アクチュエータの回転とエンドエフェクタの移動は非線形な関係となる。局所的にヤコビアンを求めることで線形化して扱うが、可到達領域や特異姿勢などの問題を考える必要がある。

また、等身大であることに起因する特徴として以下が挙げられる。

1. 高トルクな関節の危険性

人間と同等の作業能力を達成するために、最終出力段においては数十 Nm の高トルク

を發揮しており，自己干渉などの事故を起こした場合，筐体に不可逆な破壊を起こす可能性が高い。

2. 関節速度を連続にする必要性

エンドエフェクタや関節角度の指令において，位置，速度の次元において不連続な指令軌道は，実際のアクチュエータシステムに不必要に大きな出力を發揮させるなどの負担をかける．これらは一般的な大型産業用アームロボットにも共通する．

また，リアルタイム操縦であることに起因する特徴としては以下が挙げられる．

1. 将来情報を利用できない

事前に実行する動作や環境の情報がほぼ定まっている状態で，最適なロボットの動作を求め実行させる手法は大まかにオフライン軌道計画法に分類され，多くの産業用ロボットアームなどはこの手法によって運用されている．オフライン軌道計画法においては，ロボットや環境の現在の状態と最終の目標状態を終端条件とみなし，ロボットが發揮可能な最大トルク値や，姿勢のバランス等に関する力学的な条件等を制約条件とすることで，制約条件を満たすことを保証しつつ，發揮しうる最大のパフォーマンスを期待できる．一方で，ロボットを人間が操縦する場合においては，終端条件であるロボットの目標状態は人間がオンラインで変更し続けるため，制約条件を満たすためには保守的な戦略を取らざるを得ず，オフライン軌道計画のパフォーマンスを超えることは構造的に難しい．保守的な戦略に寄り過ぎれば，操縦に対するレスポンスの悪いシステムになってしまうため，如何にして制約条件を守りつつ，オフライン軌道計画におけるパフォーマンスにオンライン操縦で近づけるかが，操縦システムに問われる．

2. 人間の操縦能力の限界

人間を操縦システムの一要素とみなした場合，人間の操縦能力の限界は，システム要素の制約条件とも解釈できる．人間が同時に操ることのできるボタンやレバーの数は入出力の自由度として，反応速度は周波数特性やむだ遅れ時間として，知覚できる信号強度や四肢の最大發揮力などは入出力強度として解釈できる．これらの制約条件は必ずしも独立でなく，例えば同時に操るボタンが増えれば反応が遅れやすくなることから分かるように，相互に干渉している．人間というシステム要素が脳や神経系の能力に律速される点は，計算機がCPUや通信回路の能力に律速される点と共通してい

る。裏を返せば、脳に負担をかけない直感的で適切な専用インターフェースを提供できれば、人間にも多自由度で複雑なシステムを操縦できる可能性があるということである。

3. 通信・制御に関する制約

操縦者と操縦対象のロボットの間には、各センサのサンプリング周波数、アクチュエータ制御回路の制御周期、メイン制御プログラムの実行周期、ロボットリンク部材の弾性要素、通信ネットワークの遅延やジッタ、等の多くの位相遅れやむだ時間要素が存在する。操縦という行為の本質からして、何もフィードバックせずに指令を送り続けるフィードフォワードな操縦というものは存在しえず、必ず人間が何らかの情報を監視しつつ目標状態へ導くため、広い視点で見れば操縦システムというものは必ずフィードバック系となる。その中で特に、操縦デバイスと操縦対象ロボットが力や位置の情報を介して互いに同期されるものは、バイラテラル制御 [8] と呼ばれている。一般に、バイラテラル制御によって操縦対象ロボットが触れている物体の触覚を操縦デバイス側に伝える為に必要な制御周期はおよそ 1 kHz 程度と言われている [9]。実際に 1 kHz 以上の制御周期によって高い触覚の再現 (=ハプティクス, Haptics) を実現しているデバイスも存在するが [10]、実際に 1 kHz 以上の制御周期が達成されるケースは仮想シミュレーション空間との接続や、有線での近距離通信が多く、ping 値にして 2~3 ms を示すような実際の Ethernet 通信や、容易に 10 ms 以上のジッタを生じてしまうような無線 WiFi 通信においては十全なバイラテラル制御を達成することは難しい。

2.2 操縦による等身大ヒューマノイドロボットの運動学制御

2.2.1 人型の操縦対象における関節角指令とエンドエフェクタ位置指令

ヒューマノイド型モデルの全身姿勢を表現するデータ形式として大別して以下の2つがあり、各々メリット・デメリットを持つ。

1. 全身関節角度 (数十自由度)

脇の空き具合や内股外股、手首の返しなどの細やかな動作の特徴を含んだジェスチャーという側面での記述に優れているため、運動認識 [11]、ダンス・エンターテイメントロボット [12]、CG アニメーションの分野との親和性が高い。元となる関節角度時系

列がハードウェアのアクチュエータの制約を満たしていれば、特異姿勢や可動域限界などの問題も考える必要がない。一方で、関節配置やリンク長の異なるヒューマノイドモデル間で適用すると、本来のエンドエフェクタ軌道から逸脱したり、関節軸の配置順が異なる場合などには全く違う動作になるため、物体のマニピュレーションのような実務的な動作には不向きである。

2. エンドエフェクタ位置 (6 自由度 × 4 肢 + 頭や重心など)

両手先の間隔を 30 cm 開いて物を挟む、重心を片足の真上に乗せる、などの実務的な動作の記述や力学的な拘束条件の記述に適しており、マニピュレーションや歩行動作などと親和性が高い。操縦対象のヒューマノイドロボットに適用する際にはエンドエフェクタの目標位置や重心目標位置などを拘束条件として、逆運動学 (Inverse Kinematics, IK) を解き、最終的に得られた関節角指令値をロボットのアクチュエータシステムに送信する。ヒューマノイドモデル間で関節配置やリンク長、質量分布が異なる場合にも、逆運動学を解くことで目標エンドエフェクタ位置や目標重心位置を満たすような全身関節角度列を得られる。一方で、シリアルリンク構造の逆運動学では目標拘束条件を満たせる解の可解性という問題や、特異姿勢付近で関節速度が過大になる特異点問題に対策を講じる必要がある。

実際には、拘束条件を課した上で余剰自由度 (null space) が残されている場合も多く、拘束条件自体も必ずしも並進位置 3 DOF + 回転姿勢 3 DOF 必要でない場合もある。その場合、四肢のエンドエフェクタ位置や重心位置を拘束しつつ、余剰自由度でオリジナルの人間の関節角度に可能な限り近づけることが出来、多自由度のシリアルリンク構造で起きやすい「逆折れ」「拗れ」「絡まり」といった不都合な姿勢の回避や、脇を締める、膝を伸ばす、といった「人間らしい」動作に近づけることも可能になる。ただし、実際のヒューマノイドロボットを運用する際には、腕部と腰部の自己干渉を極力回避するために脇を空けたり、脚部が特異姿勢に陥り衝撃吸収のためのインピーダンス制御が不能になることを避けるために膝を曲げるなどすることも多く、人間らしい動作が出来るヒューマノイドロボットは一つの運動学のテーマにもなっている [13].

上記のように実際のヒューマノイドロボットを運用するにあたっては、関節角空間と各拘束点のタスク空間の両方を議論する必要があり、現状の最適解は両者に重み付けをしつつ最近傍解を利用することであろう。このような議論は、モーションキャプチャーで計測した

マーカーをヒューマノイド型モデルにマッピングするCGアニメーションのような分野で多くなされるが、ヒューマノイドロボット操縦の文脈でも不可欠な議論であると考える。

2.2.2 ヒューマノイド操縦で使用される入力デバイス

前項でヒューマノイド型モデルの操縦には全身関節角やエンドエフェクタ位置を利用することを述べた。本項ではそれらの情報を操縦者から取得する手法の分類とメリット・デメリットを説明する。

1. 物理的拘束を持つ樹脂や金属等で作られた多自由度構造のデバイスに取り付けられた位置や角度のエンコーダによって、多自由度のヒューマノイドの操縦を試みる。物理的に可動域等を制限できることや、アクチュエータによる力のフィードバック等、実務的なメリットが多い一方、導入コストが高い、人間の柔軟な運動を阻害しやすい等のデメリットがある。

(a) 小型～中型のパペット／マリオネット型

関節にエンコーダを搭載した小型の人形型デバイスを、操縦者が両手で操作して姿勢を変えつつ対象に現在の関節角度列を送る。多くの場合、対象のヒューマノイドロボットのリンク長や関節配置を再現した人形を制作する [14]、そうすることでエンドエフェクタ同士の位置関係や、自己干渉の起きる姿勢などを再現することができるメリットを持つ。一方で操縦者が両手で同時に操作できる自由度には限界があることや、小型であるがゆえに搭載できるアクチュエータの精度に限界があり、力フィードバックに向いていないことがデメリットである。

(b) 中型～大型の装着型

操縦者の骨格に沿うように配置された外骨格型のデバイスを装着して操縦する [15]。多くの場合、操縦者の各リンクと外骨格デバイスの各リンクをベルト等で拘束し、外骨格デバイスの各関節アクチュエータによって力フィードバックを行うことを目的としている。デメリットとして、操縦者の体格差によって装置自体の調整が必要であることと、容易に着脱できないために作業中断と再開のコストが大きいことが挙げられる。

(c) 大型の搭乗型

操縦者を取り囲むように配置された多関節アーム等のデバイスを介して操縦する

[16]. 操縦者とデバイスは密に拘束されず、デバイスのグリップ部やペダル部を介して拘束されることが多い。十分なリンク剛性や関節の駆動精度により、高いカフィードバック精度を実現でき、自動車の運転席のように、搭乗型のコックピット装置として実用性や信頼性を持つ。デメリットとして、操縦者の可動域の全域をカバーするためには装着型よりも大型のデバイスを配置する必要がある、設置コストが高くなる傾向にある。

2. 物理的拘束を持たない

光学計測やIMUなどを利用して操縦者の姿勢を計測する。物理的に操縦者に干渉はできないのでカフィードバックは基本的に出来ない。また、操縦者は作業中、常に重力に逆らって姿勢を維持し続ける必要があるため、長時間の作業負担が大きく、作業の中断／再開のコストも高い。大掛かりな物理デバイスを使用しないため導入コストは低くなる傾向にあるが、姿勢推定に失敗する状況も含まれるので信頼性に劣る。

(a) マーカーによる骨格推定

操縦者の全身に光学式マーカーを貼り付け、外部の複数のカメラから撮影するモーションキャプチャー型 [17] や、全身にIMUや屈曲センサを配置したスーツを着るセンサスーツ型 [18] などがある。また、近年ではバーチャルリアリティ (Virtual Reality, VR) 市場の発展に伴って、6自由度の絶対位置を計測／推定可能な小型コントローラやトラッキングデバイスなども安価に利用可能である [19]。高級機による光学計測は十分高精度であり、機構の弾性やガタの影響も考慮すれば、物理デバイスの位置計測精度を上回る可能性もある。デメリットとして、光学計測方式は人体のオクルージョンによってトラッキングが失敗するリスクが存在することと、センサスーツ型は姿勢推定の信頼性に影響されることが挙げられる。

(b) マーカー無しの骨格推定

3次元計測が可能なカメラを用いて取得した深度画像等を人間の骨格モデルに当てはめて骨格推定を行う [20]。操縦者の身体に何も装着する必要がなく、導入コストが低いというメリットを持つ。近年では2次元のカメラ画像からも深層学習技術を利用して人間の抽出と骨格の推定が出来るようになってきており [21]、身近なデバイスを用いてヒューマノイドモデルの全身操縦が可能になることが期待

できるが、マーカー付きの計測方式に対して推定精度や信頼性が劣る。

2.3 操縦による等身大ヒューマノイドロボットの動力学制御

従来、ヒューマノイドロボットの遠隔操縦というテーマにおいては、主に上半身に焦点を当てたマスタ・スレーブ制御／バイラテラル制御によって物体操作タスク等に取り組むことが多かった [2, 3, 22, 23, 24, 15]。しかし、オンライン遠隔操縦を全身に拡張する場合、従来は主に上半身の運動学制御であった課題に、下半身動作による全身の動力学制御という課題が追加され、その難易度は格段に高くなる。下半身動作をマスタ・スレーブ方式によって操縦する場合に特に問題になる要素として以下のものが挙げられる。

1. 重心のダイナミクス制御

二足歩行型ヒューマノイドロボットは重心の高さに対して足裏支持領域の大きさに乏しく、倒立振り子のように不安定な力学モデルに近似して扱うことが多い。そのため、不用意な重心移動を伴う動作指令は転倒を招くことになるが、一方で重心や脚の運動を準静的なまでに抑制 [25, 26, 27] すれば、スムーズな全身動作が阻害されてしまう。

2. 足裏接地制御

自由度の高い脚部のマスタ・スレーブ操縦が望まれる一方で、地面と足裏の接触状態は、ヒューマノイドロボットのバランスに大きな影響を与える。急速な着地の衝撃や、地面を擦るような水平方向の対地速度は、転倒や両足間の過大な内力の蓄積を招く。

2.4 自動車や航空機に見る複雑系の実用的操縦システムとヒューマノイドロボット操縦システムへの応用

2.4.1 自動車の各種安全制御

現代の自動車は数万点にも及ぶ部品によって構成されているにもかかわらず、基本的にはハンドルとアクセル操作のみで誰でも容易に操縦できる。4輪自動車は無駆動状態でも安定に姿勢を維持できるとはいえ、不用意な加減速やカーブ操作を行えばスリップや横転が起こる動力学系かつ劣駆動系である。その点においてヒューマノイドロボットは共通点を持つため、その操縦システムが得られる示唆は多い。

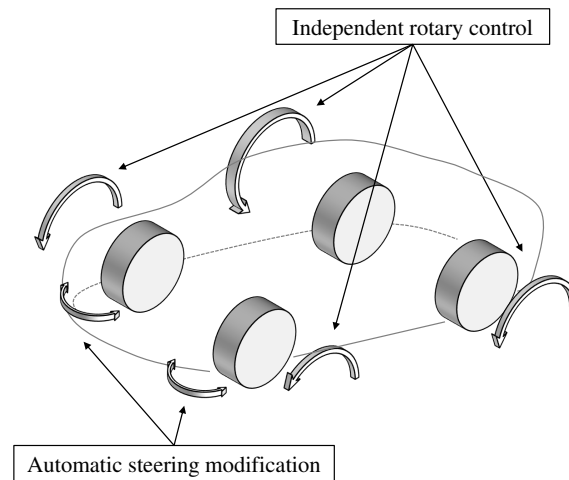


Fig 2.1: Modern automobile has several computer controlled steering support system

1. 少自由度に抽象化された操縦系

4輪自動車は最も複雑に捉えた場合、4輪それぞれに独立に車輪回転角と舵角をもつ $4 \times 2 = 8$ 自由度系と解釈できる。しかし、一般の操縦者が8自由度を独立に操縦しながら一般道を運行することは難しく、実際には基本的にハンドル操舵角とアクセル踏み込み量の2自由度の操縦のみによって運転できるように簡略化されている。ただし、一部の特殊車両では前輪と後輪を独立に操舵できる四輪操舵 (4 Wheel Steering, 4WS) によって小回り性能や平行移動機能などのメリットを得ている。にもかかわらず、一般車において4WSを採用していない理由は、コストパフォーマンスの観点もあろうが、多自由度な操縦機能によって得られる特殊なメリットに対して、簡略な操縦システムによって得られる操縦性というメリットが上回ったからであろう。

2. 電子制御化された接触摩擦制御

実際の自動車の4輪は全て独立に回転しているわけでもなければ、すべて同じ回転に拘束されているわけでもない。それらは電子制御によって、操縦者が意識せずとも常に良好なグリップ特性を得られるように制御されている。代表的なものに以下のものが挙げられる。

(a) アンチロック・ブレーキ・システム (Antilock Brake System, ABS)

急ブレーキ時にタイヤと路面がスリップして制動力を失わないよう、スリップする一歩手前を維持したまま徐々に減速するブレーキシステム

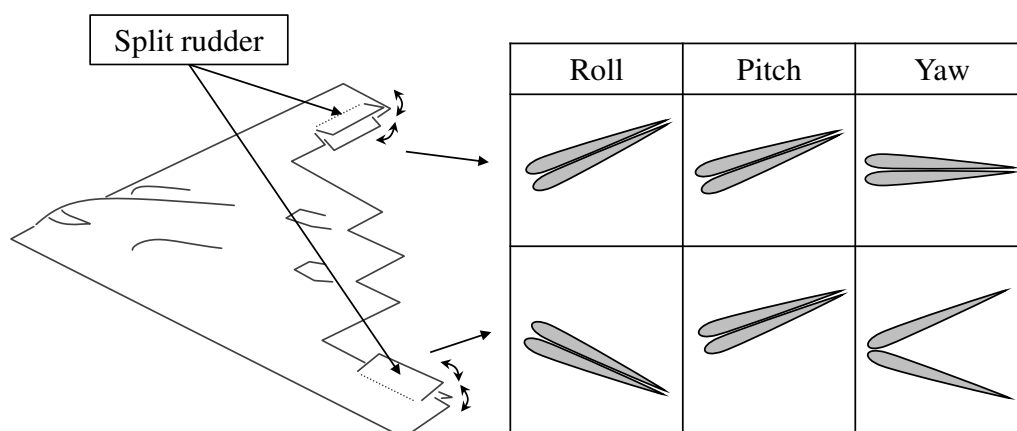


Fig 2.2: A flying wing aircraft B-2 has a Fly-By-Wire system to control its delicate aero dynamics

(b) トラクションコントロール (Traction Control System, TCS)

悪路走行時などのタイヤの空転が起こる状況下で、4輪のタイヤのそれぞれに対して空転が起こらないよう制御する。

(c) 横滑り防止装置 (Electronic Stability Control, ESC)

急カーブ時などに車体の横滑りやスピンが起きることを検出し、4輪のタイヤのそれぞれの回転速度を適切に抑制し、走行軌道を修正する。ABSやTCSの機能を包含しているともいえる。

これらはいずれも、タイヤと地面の接触状態を制御するものであり、ESCに至ってはより高度に走行軌道にも介入している。

2.4.2 航空機の電子制御

近代の航空機の制御系統ではフライ・バイ・ワイヤ (Fly By Wire, FBW)[28] という概念が有力視され、実用化されている。従来の操縦者による油圧系統を介した直接操舵に対して、油圧系統を電気式配線系統に置き換えることで部品の簡略化や信頼性を向上させたり、全翼機や垂直離陸機などの特殊な航空機の姿勢安定化をコンピュータ制御によって行うことを指す。2.4.1で述べた自動車の高度電子制御化の潮流は、航空機のフライ・バイ・ワイヤに対して、ドライブ・バイ・ワイヤ (Drive By Wire) と呼ばれる [29, 30]。フライ・バイ・ワイヤの適用例の一つとして、全翼機 B-2[31] の動翼制御がある。一般的な航空機であれば、roll, pitch, yaw 回転に対して、主翼左右端のエロン (aileron)、水平尾翼のエレベーター (elevator)、垂

直尾翼のラダー (rudder) が対応しており、パイロットはそれらを独立に操作して手動操縦によって姿勢制御が可能である。しかし、Fig. 2.2 のように全翼機では尾翼が存在せず、通常の航空機におけるエルロンに相当する動翼が、roll と pitch 回転の両方を担うエレボン (elevator) と呼ばれ、ラダーに相当するものは主翼左右端のドラッグ・ラダー (drag rudder) という空力ブレーキのような機構が担っている。B-2 に至っては、スプリット・ラダー (split rudder) という2枚の動翼が上下に重ねられた機構が、必要に応じて同角度で動いたり、上下に開いてブレーキを掛けたりすることで、エレボンとドラッグ・ラダーの機能を兼ね備えている。つまり、スプリット・ラダーの操作量は roll, pitch, yaw 全てに干渉しており、人間の操縦者にはとても手動操縦できないものになっている。これらを人間に扱える操作量に変換してくれる仕組みがフライ・バイ・ワイヤである。

ヒューマノイドロボットの姿勢制御においても、全身の関節の一挙一動は重心の運動に影響し、足裏の微小な位置姿勢の変動は姿勢のダイナミクスに大きな影響を与える。複雑なダイナミクスと可動自由度を持つ点で航空機とヒューマノイドロボットは共通していると言える。

2.4.3 操縦システムの操縦性、安定性、操舵反力特性

操縦システムというものは人間の操縦者がシステムの構成要素として介在するため、そのよし悪しは操縦者の熟練度や嗜好にも依存するため元来、定量化しにくい [32]。しかし、いくつかの指標は操縦者から分離した機体のみの特性であったり、経験的に正当性が確認されているものがあるため紹介する。

1. 操縦性

操縦者の操舵に対する追従性をさす。自動車や船舶では Yaw 方向の旋回 [33][34]、航空機であれば roll, pitch, yaw 方向それぞれについて議論できる [32]。操舵性、操作性と呼称する場合もある。

2. 安定性

自動車においては走行安定性と呼称され、重心高さや車体剛性等によって外乱の影響を低く抑えられる性能を指し、特に直進安定性という場合、前輪に設けられた微小なキャスト角によってハンドルから手を放していても自然に直進に戻る特性を指す。航空機においても同様に操舵後や無操舵時に姿勢が一定に収束する性能を指し、より詳

細には縦安定，横安定，静安定，動安定と細分化されていく．これらの性能が高いと長距離，長時間操縦時の操縦者の負担を減らす効果が知られている．

3. 操舵反力特性

自動車も航空機も従来は機械式，油圧式だった操舵系統が電気式へと進化しているが，ハンドルや操縦桿から操縦者に伝わってくる操舵反力は大きすぎても小さすぎても良好な操舵感が得られないことが知られている [35]．

また，自動車，航空機ともに操縦性と安定性は相反する傾向にあることも重要な示唆となる．これらの議論をヒューマノイド操縦システムに適用すると以下のようなになる．

1. ヒューマノイド操縦システムの操縦性

操縦対象部位である手先，足先，重心，頭などの X, Y, Z, roll, pitch, yaw それぞれに対する入出力応答性と定義できる．ただし，ヒューマノイドの全身の操縦性を議論する場合は，すべての操縦対象部位に対応するだけの自由度を有するか否かが第一に課題となる．

2. ヒューマノイド操縦システムの安定性

無操作時に安全な姿勢に収束すること，あるいは一定の姿勢維持時に操縦者の負担が少ないことと定義できる．適切に重力補償や姿勢維持機構が実装されている物理インターフェースなどは安定性が高いと言える．

3. ヒューマノイド操縦システムの操舵反力特性

力覚や触覚フィードバックによる物体や環境接触の再現性と定義できる．自動車や航空機が物理インターフェースを持ち，操舵量に応じた操舵反力を返すことを鑑みれば，力フィードバックが利用可能な物理インターフェースがより操舵感を再現していると言える．

2.5 本章のまとめ

本章では，人間の操縦者によって操縦される等身大ヒューマノイドロボット操縦システムに関して特有の問題を挙げると共に，自動車や航空機において実用化されている操縦アシスト技術から有用な示唆が得られることを述べた．自動車の各種タイヤコントロール制御であ

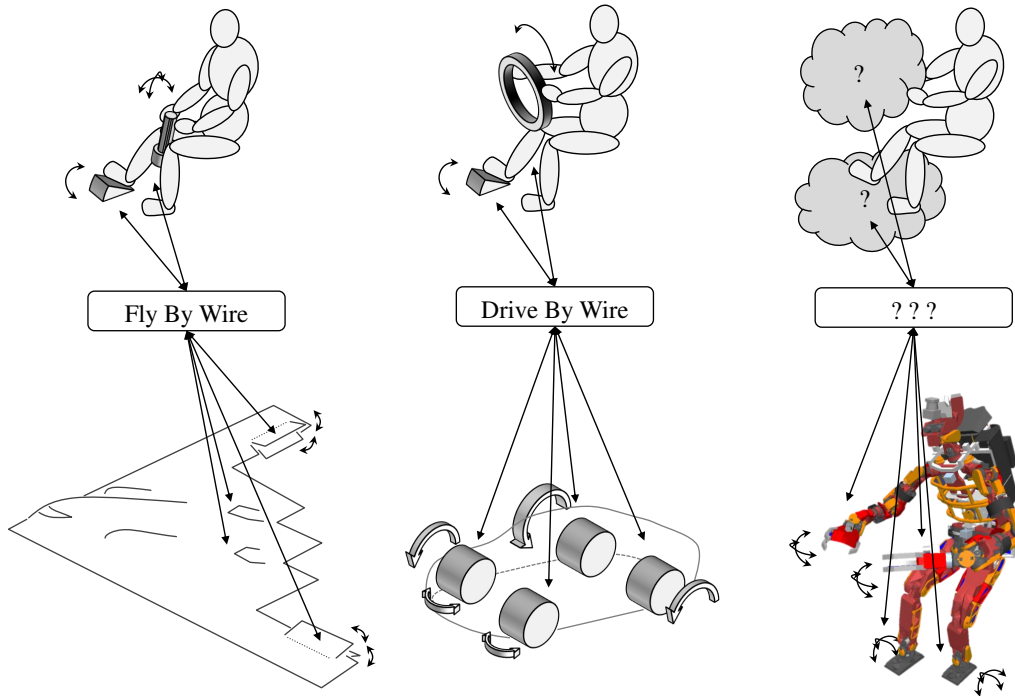


Fig 2.3: A concept of user-friendly operation system for humanoid robot

るドライブ・バイ・ワイヤ，航空機の各種空力姿勢制御であるフライ・バイ・ワイヤは，機体の姿勢制御のうち，人間には不可能な複雑な力学制御を担うことで，操縦安定性の向上や，これまで不可能であった複雑系の操縦を可能にした．本研究の主な研究方針は Fig. 2.3 のように，自動車や航空機と同様に複雑な機構とダイナミクスを有するヒューマノイドロボットに対して，その操縦安定性や操舵反力特性を向上させる為に必要な操縦システムの構成要素を議論して行くことである．

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

3.1 はじめに

本章では二足歩行型ヒューマノイドロボット操縦システムにおいて、操縦システム評価項目の操縦性、安定性、操舵反力特性の内、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る。前章でヒューマノイドロボットの全身操縦においては、全身関節の運動学制御より、二脚ロボットの姿勢安定化に関する動力学制御が致命的であると述べた。操縦アシスト技術一般に共通する傾向として、適用するアシスト制御の自律度が高ければ安定性が増す一方、操縦者の入力に反映されず操縦性を損なう。逆にアシスト制御の自律度を下げて操縦者入力を忠実に再現すれば操縦性は増す一方、操縦対象の安定性を損なう。ヒューマノイドロボットの脚操縦に当てはめると、操縦者入力をバッファリングして予見制御等の軌道計画を適用する手法 [36] は安定性を保証するものの操縦性を欠き、操縦者の脚運動入力を重心-ZMP レベルで同期する手法 [37, 38] は操縦性は高いものの安定性を欠く。本章で説明する二脚動力学アシスト制御は、ある保守的な制約を課すことで、日常的な脚動作の範囲内であれば、動的な脚運動の操縦性を維持しつつ、安定性を保証する事が出来る。

3.2 DCM/CCM に基づく重心速度制限による二脚動力学アシスト

3.2.1 前提となる二脚ロボット制御系

本研究で扱う二脚動力学アシスト技術は、重心-ZMP モデルかつ、力センサ等で足裏反力制御が可能なロボットシステムを前提としている。重心-ZMP モデル [39, 40] は重心高さを時不変と仮定した式 (3.1) で表す。

$$\begin{cases} \ddot{x} &= \frac{g}{h}(x - x_Z) \\ \ddot{y} &= \frac{g}{h}(y - y_Z) \\ z &= h \quad (const) \end{cases} \quad (3.1)$$

上記において、 x, y, z は絶対座標系における重心位置であり、前 X, 左 Y, 上 Z を想定している。 g は重力加速度、 x_Z, y_Z は床平面における Zero Moment Point (ZMP)[41] の位置である。重心高さ h は制御モデルにおいては時不変を仮定しているが、実際には操縦者によって準静的に操作可能にしている。ZMP は二足歩行制御において、足裏の接触状態の良否を議論する指標として計測したり、足裏接触力制御等と組み合わせて所望の目標 ZMP 位置を達成することで意図的に重心-ZMP モデルを制御するために使われている。

式 (3.1) の X 成分のみを状態方程式形式で書き直すと以下ようになる。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ g/h & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -g/h \end{pmatrix} x_Z \quad (3.2)$$

これを対角正準形式に変換すると,

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x_{\text{CCM}} \\ x_{\text{DCM}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sqrt{g/h} & 0 \\ 0 & \sqrt{g/h} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{\text{CCM}} \\ x_{\text{DCM}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sqrt{g/h} \\ -\sqrt{g/h} \end{pmatrix} x_Z \quad (3.3)$$

$$\text{where } \begin{pmatrix} x_{\text{CCM}} \\ x_{\text{DCM}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1/\sqrt{g/h} \\ 1 & 1/\sqrt{g/h} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

とでき, $x_Z = C_Z$ で時不変の定数と仮定すると, このときの一般解は,

$$\begin{pmatrix} x_{\text{CCM}} \\ x_{\text{DCM}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1 e^{-\sqrt{g/h}t} + C_Z \\ C_2 e^{\sqrt{g/h}t} + C_Z \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

この一般解の形からわかるように, x_Z が定数の時に x_{CCM} は x_Z に収束, x_{DCM} は x_Z から発散するような挙動を示すことがわかる. このことから, x_{CCM} を Convergent Component of Motion (CCM), x_{DCM} を Divergent Component of Motion (DCM), と呼ぶ [42]. この基底変換によって得られた CCM に関しては ZMP に収束していくことが保証されているため, 系の安定化のためには発散的挙動を示す DCM のみを制御すれば良いというのが基本的な考え方である.

X-Y 平面上に関する CCM と DCM をまとめると,

$$p_{\text{CCM}} := p_G - \dot{p}_G \sqrt{\frac{h}{g}} \quad (3.6)$$

$$p_{\text{DCM}} := p_G + \dot{p}_G \sqrt{\frac{h}{g}} \quad (3.7)$$

特に, (3.7) の式は Capture Point (CP)[43] としても知られており, 倒立振り子の軌道エネルギーの観点から, 次の瞬間に Capture Point に ZMP を重ねることが出来れば重心を静定できる点として, 二足歩行における転倒指標などに利用されている. 実際には, Capture Point は常に発散して遠ざかっていくため, 遊脚を着地させるまでの時間遅れ分を補正する必要があるため, 遊脚着地時間遅れ分を補正したものを Capture Point と呼び, (3.7) の式はある時刻の瞬間的なものとして Instantaneous Capture Point(ICP) と呼ぶこともある.

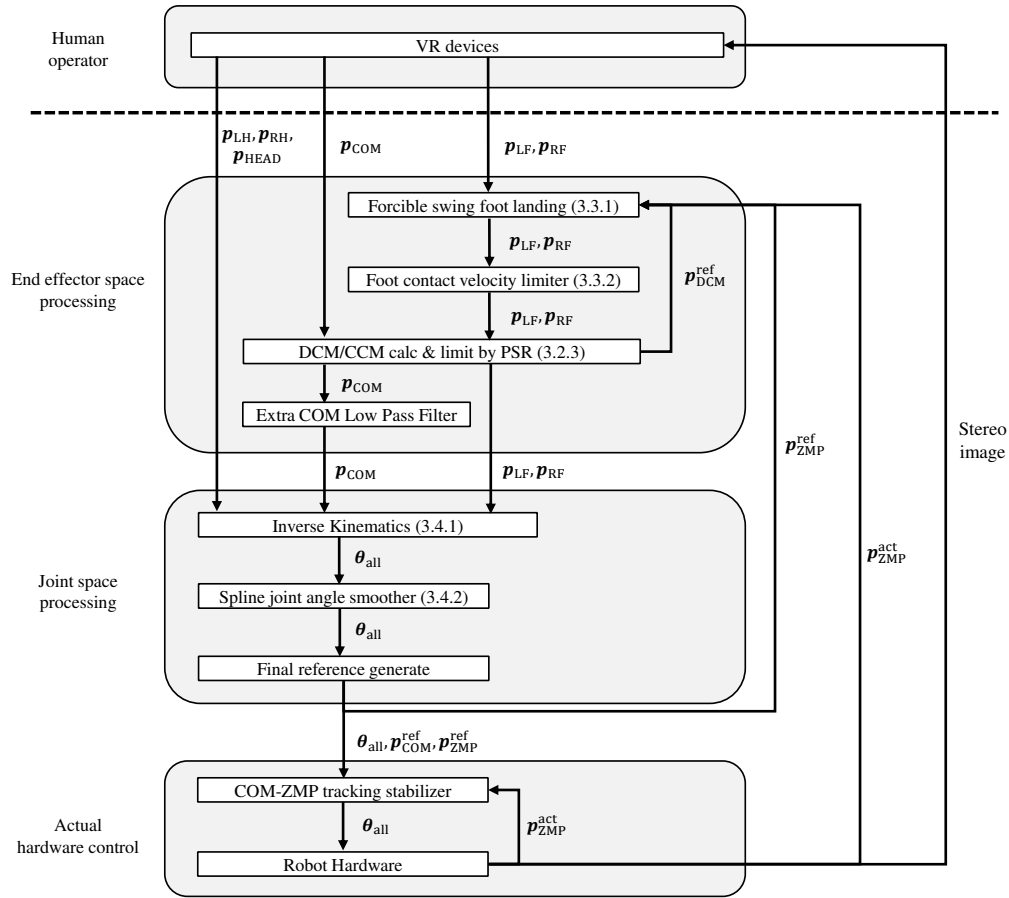


Fig 3.1: Overview of real time whole body safety processing

3.2.2 二脚力学アシストシステムの制御フロー

本研究の核となるリアルタイム二脚力学アシスト制御の制御フローが Fig. 3.1 に要約されている。この提案手法の特徴として遅延を極力回避したリアルタイム操縦システムであることが挙げられる。脚運動を操縦によって実行する場合、従来は操縦者の脚運動をバッファに溜めて予見制御によって事前に軌道計画を行うもの [44] や、HMM 等によるジェスチャー認識によって操縦者の運動を簡便なコマンド指令に変換していたため、本質的に無視できない時間幅の遅延を必要としていた。一方、本提案手法の主な戦略は、操縦者の操作入力に対して順次各種のフィルタリングを施すことによって、毎制御周期ごとに脚運動のダイナミクスとして feasible な指令値に修正することである。その効果として、

- メリット

操縦者入力からロボット出力までの制御処理において、明示的な遅延時間を生まない

- デメリット

バッファ区間や予見区間を持たないため、各種制約条件を満たすためには保守的な戦略を採らざるを得ない

が挙げられる。各処理の詳細は後述するが、本制御フローの概要は以下のようになっている。

1. 操縦者からの手先，足先，重心位置姿勢入力を受け取る
2. 現在の ZMP，DCM の指令/実測値に基づき，必要ならば強制的に遊脚を接地
3. 着地時の対地相対速度を安全に調整
4. 重心速度を DCM/CCM が支持領域に収まるように抑制
5. 修正された各種拘束位置情報から逆運動学を解く
6. 全身関節角度を実機ロボットの関節速度制限を満たすようスプライン補間
7. 補間後のロボットの状態から全身関節角，重心目標位置，ZMP 目標位置を最終決定
8. ロボットからの実測 ZMP を次回強制遊脚接地判定の為にフィードバック

3.2.3 DCM/CCM による重心速度制限

この制約の戦略は、常に次の瞬間に両足で制動可能な範囲内で、重心の動的な運動を許可するというものである。まず、Fig. 3.2 のように、両足支持期と片足支持期に関わらず常に、両足裏の地面への投影面で形成される凸包を Predicted Support Region (PSR) と呼称する。跳躍や走行などの極端に動的な脚運動を除き、大部分の動的な脚運動は片足支持と両足支持を交互に切り替えながら動的な重心運動を実行している。脚運動を操縦によって実現する場合に特に注力すべき点は、円滑な重心運動や足裏支持状態の切り替えと、重心バランスの安全性のトレードオフである。重心を制動するために効果のある指標は Capture Point 又は DCM であるが、片足支持期に支持脚の片足支持領域内 (Fig. 3.2 中”actual support region”) に DCM を収めるだけでは、片足支持から両足支持に完全に切り替わるまで重心が支持脚領域を出ないような、一般的に静歩行と呼ばれるような脚運動に近くなってしまう。

本研究では、片足支持期においても DCM を両足支持領域内へ移動することを許可することで、円滑な重心運動を実現している。DCM が片足支持領域を出ても、次の瞬間形成可能

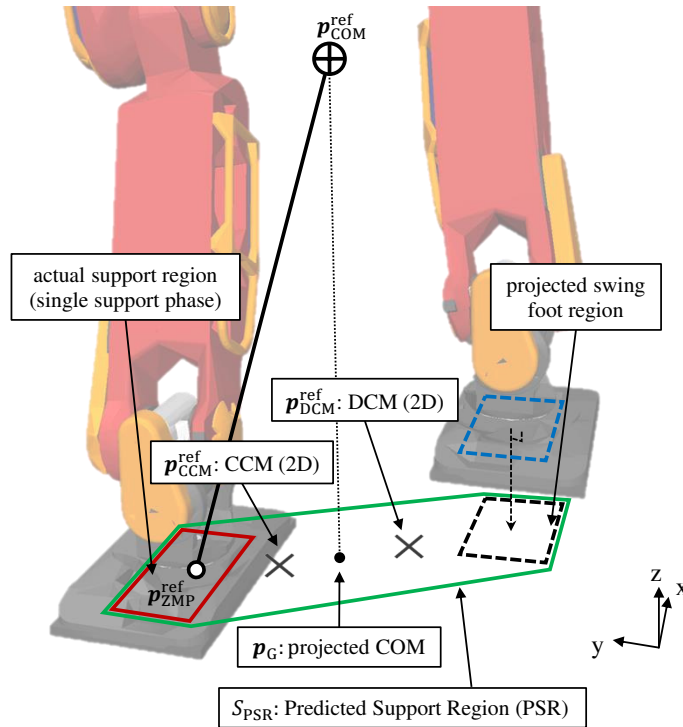


Fig 3.2: Predicted Support Region: this region is formed with the both foot region even if the swing foot is in the air

な両足支持領域である Predicted Support Region に収まっていれば、速やかに両足支持状態に移行することで十分制動可能であるという考え方である。

しかし、遊脚を高く上げている場合には、接地させるまでに無視できない時間を必要とする場合があるため、これを補正する必要が出てくる。そこで実際には、Fig. 3.3 のように遊脚高さに比例した補正を適用する。実際のロボットの遊脚が発揮可能な垂直方向の最大平均速度を V_f^{\max} とし、遊脚の接地までに必要な遅れ時間を T_d とすると、 T_d は以下のように見積れる。

$$T_d := \frac{h_f}{V_f^{\max}} \quad (3.8)$$

ここで、 h_f はその瞬間における遊脚の足上げ高さである。厳密には非線形なリンク構造であるロボットが発揮できるエンドエフェクタの最大速度は姿勢によって異なるため、 V_f^{\max} は概算値にならざるを得ないが、低く見積もれば安全側に振ることができる。

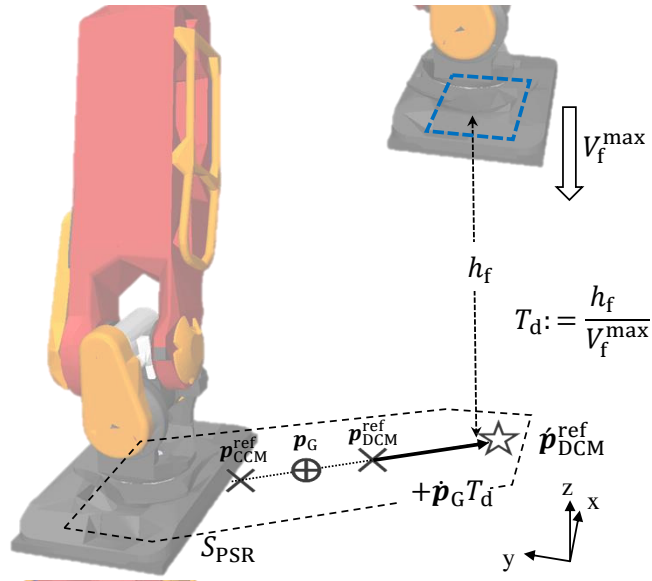


Fig 3.3: Online COM velocity modification for bipedal robot: the COM velocity will be regulated when its $\dot{\mathbf{p}}_{DCM}$ or \mathbf{p}_{CCM} go outside of the PSR. The $\dot{\mathbf{p}}_{DCM}$ includes the delay of the swing foot landing, even if the swing foot is lifted highly, the robot can safely contact its swing foot.

この時間遅れを DCM に適用すると、以下のようにできる。

$$\dot{\mathbf{p}}_{DCM}^{ref} := \mathbf{p}_G + \dot{\mathbf{p}}_G \left(\sqrt{\frac{h}{g}} + T_d \right) \quad (3.9)$$

この式は、式 (3.7) の DCM を $\dot{\mathbf{p}}_G T_d$ だけ延長したものである。 T_d 秒後の DCM や Capture Point を厳密に特定するためには、式 (3.5) を使うことを考えるが、時不変の定数である ZMP をどこに設定するかという問題があるため、ここでは単純に現在の重心速度 $\dot{\mathbf{p}}_G$ のまま T_d 秒に移動しているであろう距離をオフセットとして足しこんでいる。

これらの DCM を用いた重心速度制限は、重心の減速に関する制約として機能するが、重心の加速に関する制約として、DCM と対となる CCM を利用することを考える。本来は ZMP を足裏領域内に収めるよう加減速を制限する戦略が正攻法であるが、重心の運動と対応する ZMP を算出するためには、重心の加速度の数値計算を要するため、2 階の後退差分における数値誤差ノイズの対策のためのフィルターなど、懸念事項が多い。一方で CCM の算出には重心の速度までの計算しか要しないため、数値的にも安定し扱いやすい。ただし、速度次元までしか制限していないことになるため、不連続な速度の影響によって無限大の加速度を要し、目標 ZMP が支持領域をはみ出る可能性もある。理論的にはそのような目標運動だ

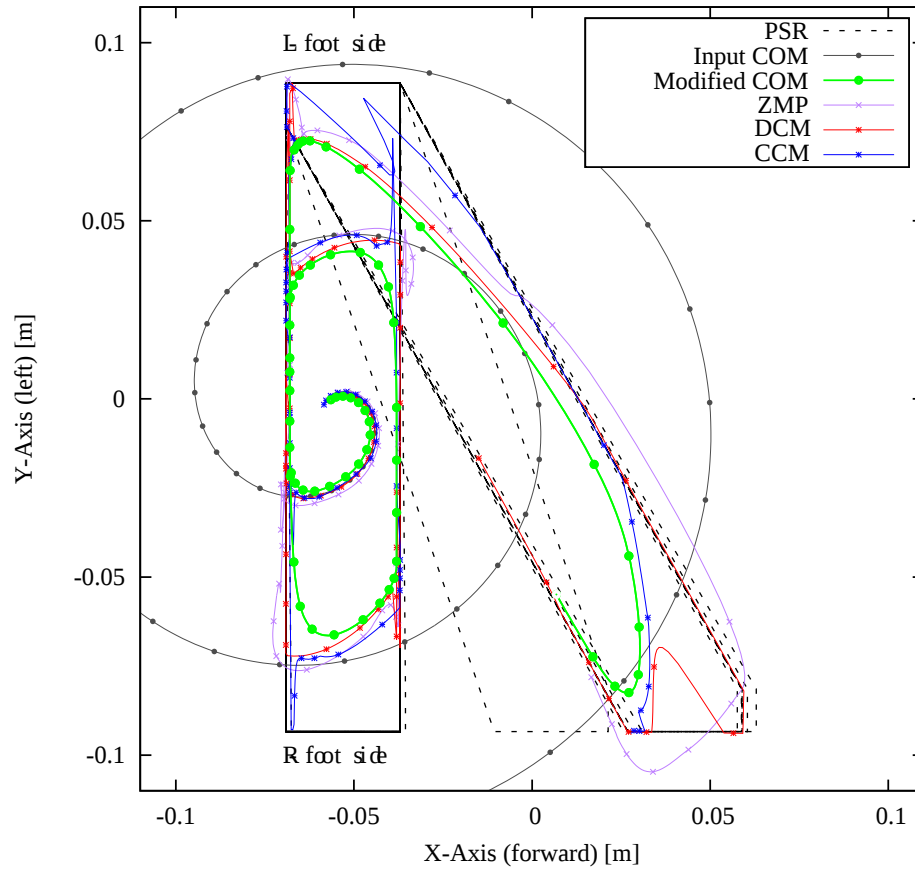


Fig 3.4: Input COM is given as the coiled shape as an example, the PSR is sequentially updated with the forward move of the right foot. ZMP, DCM, CCM are calculated from the Modified COM. The output COM trajectory is forcibly modified to keep its both DCM/CCM inside of the PSR.

としても倒立振り子の力学モデルとして制動可能な範囲内の速度域に収まっていれば転倒しないが、剛性の低いロボットハードウェアや剛体接触計算を伴う順動力学シミュレーションではそのような速度不連続な目標軌道は足裏接触状態の剥離やチャタリングを引き起こすため、Fig. 3.1 中の“Extra COM Low Pass Filter”による実機性能に依存した速度円滑化を必要とする場合が多い。このローパスフィルタのカットオフ周波数は実機ヒューマノイドロボットがハードウェアとして実行可能な重心揺動の最高周波数前後に設定するとよい。総括すると、DCM/CCMによる重心速度制限とは、本来ZMPによる制約条件を扱うべきであった問題を、速度次元のDCM/CCMによって条件を緩和することで、実時間で利用しやすいフィルター形式に落とし込んだものと言える。

ここまでで説明した重心速度制限が実際にどのように機能するかを説明するために Fig. 3.4 を示す。このグラフは検証として渦巻き状の重心位置指令が入力しつつ、右足を一步前進させるようなシミュレーションを行った際の各データの変遷を示している。図中では“Input COM”が渦巻き状に変化していることに対しても、DCM と CCM は常に支持領域内に収まるように重心が減速されていることがわかる。その結果、重心は倒立振り子として力学的に Feasible な軌道になっている。生成された重心軌道から逆算された ZMP に関しては、重心運動に関して加速度次元ではなく速度次元の DCM/CCM のみを制約として考慮しているため、局所的に支持領域からはみ出るような軌道が図示されているが、実際には ZMP は支持領域端で飽和し転倒に至ることはない。

3.3 自動化された遊脚接地制御

3.3.1 強制遊脚接地制御

3.2.3 で述べた重心速度の制約は、DCM/CCM を常に両足で形成される Predicted Support Region に収めることで、いつでも両足で制動できるように制約するものであった。ここでは実際にどのように両足を駆動するかを説明する。二脚運動では、要求する重心運動に対応する ZMP 位置に対して、それを包含する支持領域が存在しなければ、所望の ZMP を発揮することは出来ない。DCM に関して、DCM が支持脚の支持領域から遊脚に向かっている場合、将来的に遊脚で制動する必要が必ず生じるため、予め遊脚を下し始めてもよいであろう。このように、重心のダイナミクスに関わる ZMP や DCM と、制動の可否にかかわる支持領域の形成は、連動すべきである。ZMP や DCM の状態を常に人間が監視して両足の運動を操縦するということは現実的でないため、強制遊脚接地制御ではこれを自動で制御する。

監視する対象の候補として以下のものが挙げられる。

1. 指令重心軌道から計算した ZMP: p_{ZMP}^{ref}
2. 実機ロボットの足裏力センサ値から計算した ZMP: p_{ZMP}^{act}
3. 指令重心軌道と遊脚高さから計算した拡張 DCM: \hat{p}_{DCM}^{ref}
4. (実機ロボットの状態推定から計算した DCM: p_{DCM}^{act})

これらの値が片足支持領域をはみ出そうになった場合に強制的に遊脚を下すことで、転倒のリスクを回避することが出来る。各指標による強制遊脚接地が有効に働く局面は異なる。

1は基本となる判定である。前述のDCM/CCMによる重心速度制限で確定した指令重心軌道を、Fig. 3.1中の”Inverse Kinematics”と”Spline Joint angle smoother”に通した後、実際に実行される直前の姿勢の重心軌道を得る。これに対して過去2フレーム分の後退差分によってZMPを計算する。このZMPが完全に片足支持領域内に収まっていない期間には遊脚を地面から離さないようロックする。これによって、人間からの入力では片足支持状態に移行していても、ロボット側はまだZMPが片足に移行しきっていない、等の局面で転倒を防ぐことができる。

2は実機の足裏力センサから計測したZMPによって1と同様の遊脚ロックを行う。実機の質量分布の違いや、重心-ZMPモデルでは考慮しきれなかった全身リンクの慣性の影響、あるいは外乱によって、実際のZMPが指令ZMP通りに遷移しなかった場合にも対応できる。ただし、対応できるのはあくまで遊脚が存在する方向にZMPが振れた場合のみであり、逆方向に振れた場合に遊脚を下ろしても制動効果はない。

3は必ずしも必要ではないが、DCMはZMPに先んじて遊脚方向に向かうため、より安全な遊脚の接地戦略を採るなら、DCMが支持脚支持領域を出た段階で遊脚の降下を始めて良いだろう。

4は本研究では採用していないが、実機のIMUの情報から、世界座標系における実際の重心速度を計測することで、支持脚で小石を踏んだ時など、実機のZMPも支持脚支持領域を出ていないが、実際の姿勢は傾き始めているような状況に対応できる可能性がある。

3.3.2 地面との衝突や内力の蓄積を防ぐ対地速度制限

遊脚が地面と接触する際の対地速度の大小は、脚運動の安定性に大きな影響を持つ。関節トルク制御や、足先インピーダンス制御などが有効になっていたとしても、過大な垂直下降速度で地面と衝突すれば、立位バランスを大きく崩す衝撃力の外乱となる。また、水平対地速度に関しても、遊脚と地面の接触の瞬間に水平速度が残っていると、地面と遊脚足裏を擦るように接地し、バランスを崩すか、両足裏間で内力が発生し関節に負担を掛ける。そのため脚ロボットの足先軌道にはサイクロイドのような、地面に対して減速しながら垂直に進入するような軌道が好まれる。本操縦システムにおいては、下向きの垂直進入速度と、水平進入速度に関して、各々地面に近づくに連れて減速するような速度制限を課すことで、安全な遊脚接地を実現している。

3.4 エンドエフェクタ空間と関節空間でロバストな運動学

3.4.1 多拘束条件にロバストな逆運動学

通常のヒューマノイドロボットの動作生成にも共通することではあるが、ヒューマノイドロボットの姿勢の逆運動学には多くの拘束条件が課せられる。列挙すると、

1. 四肢エンドエフェクタ位置姿勢

基本的なシリアルリンク構造のヤコビアンを用いる。

2. 重心位置

重心ヤコビアンを用いる。その他に簡易的に重心位置を拘束する方法としてベースリンクを微小に平行移動させて目標重心位置に近づけていく方法もある。

3. 重心周り角運動量

角運動量ヤコビアンを用いる。他の拘束条件が位置の次元の物理量を扱うのに対して、角運動量の拘束は速度の次元の物理量を扱うためやや特殊になる。現実的には四肢エンドエフェクタと重心位置が拘束されたヒューマノイドロボットが余剰自由度で発揮できる角運動量は限られているため、目標角運動量に上限を設けるか、拘束条件の重みを下げる、もしくは状況によって他拘束条件との ON/OFF を切り替えるなどの運用を考える必要もある。

4. 関節角リミット制限

関節角度リミットを超えないように、現在角がリミット角に近付くにつれて関節角にかかる更新重みを増大させていくことで、余剰自由度があれば上手く関節角リミットに達することを回避できる。簡易的には収束計算の中で強制的に関節角リミット制限内に上書きすることでも制約は満たせる。

5. 目標関節角度

主に上半身などの、拘束条件数に対して余剰自由度がある関節群に対して、目標姿勢を与えることで肘が逆折れするなどの不都合な姿勢を回避したり、より人間らしい姿勢に近づけたりすることが出来る。簡易的には収束計算の中で微少量ずつ各関節を目標姿勢にずらすことでも実現可能であるが、収束性が悪くなる。

$$\begin{array}{c}
 1 \\
 6 \\
 6 \\
 6 \\
 6 \\
 2 \\
 3 \\
 3 \\
 0 \\
 16
 \end{array}
 \begin{pmatrix}
 \mathbf{p}_{RF}^{\text{ref}} - \mathbf{p}_{RF}^{\text{act}} \\
 \mathbf{p}_{LF}^{\text{ref}} - \mathbf{p}_{LF}^{\text{act}} \\
 \mathbf{p}_{RH}^{\text{ref}} - \mathbf{p}_{RH}^{\text{act}} \\
 \mathbf{p}_{LH}^{\text{ref}} - \mathbf{p}_{LH}^{\text{act}} \\
 \mathbf{p}_{HEAD}^{\text{ref}} - \mathbf{p}_{HEAD}^{\text{act}} \\
 \mathbf{p}_{BASE}^{\text{ref}} - \mathbf{p}_{BASE}^{\text{act}} \\
 \mathbf{p}_{COM}^{\text{ref}} - \mathbf{p}_{COM}^{\text{act}} \\
 (\boldsymbol{\omega}_{AM}^{\text{ref}} - \boldsymbol{\omega}_{AM}^{\text{act}})\Delta t \\
 \boldsymbol{\theta}_{JOINTS}^{\text{ref}} - \boldsymbol{\theta}_{JOINTS}^{\text{act}}
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 \mathbf{J}_{RF}^{\text{JOINTS}} \\
 \mathbf{J}_{LF}^{\text{JOINTS}} \\
 \mathbf{J}_{RH}^{\text{JOINTS}} \\
 \mathbf{J}_{LH}^{\text{JOINTS}} \\
 \mathbf{J}_{HEAD}^{\text{JOINTS}} \\
 \mathbf{0} \\
 \mathbf{J}_{COM}^{\text{JOINTS}} \\
 \mathbf{J}_{AM}^{\text{JOINTS}} \\
 \mathbf{I}
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 \mathbf{J}_{RF}^{\text{BASE}} \\
 \mathbf{J}_{LF}^{\text{BASE}} \\
 \mathbf{J}_{RH}^{\text{BASE}} \\
 \mathbf{J}_{LH}^{\text{BASE}} \\
 \mathbf{J}_{HEAD}^{\text{BASE}} \\
 \mathbf{I} \\
 \mathbf{J}_{COM}^{\text{BASE}} \\
 \mathbf{J}_{AM}^{\text{BASE}} \\
 \mathbf{0}
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 \boldsymbol{\theta}_{JOINTS}^{\text{ans}}\Delta t \\
 \mathbf{v}_{BASE}^{\text{ans}}\Delta t
 \end{pmatrix}
 \begin{array}{c}
 33 \\
 6
 \end{array}$$

Fig 3.5: Actual form of the differential kinematics equation for full body inverse kinematics

すべての拘束条件に共通のことだが、位置姿勢の拘束であれば必ずしも 6DOF 全て等しく拘束するというわけではなく、足先の Z 方向高さのみを強く拘束して XY 方向の拘束条件に関する重みを下げたり、体幹関節の大きな変動を抑制するためにあらかじめ高い重みを設定したりなど、より多彩な逆運動学の設定が必要とされる。

規模が小さく解析的に解けるような特殊な場合を除いて、一般的に逆運動学は以下の微分運動学の関係式の逆問題を、数値的に繰り返し解くことで達成できる。

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (3.10)$$

特にヒューマノイドロボットの場合、 $\dot{\mathbf{p}}$ は全ての拘束条件の目標値と現在値の差分、 $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ は浮遊ベースリンク含む全身関節から各拘束条件へのヤコビアン、 $\dot{\mathbf{q}}$ は浮遊ベースリンク含む全身関節角の変化量である。回転 3 自由度の表現は角速度ベクトル形式であることに注意されたい。

本研究の適用状況に即して詳細に記述すると Fig. 3.5 のようになる。ここでの添え字の意味は、"ref":目標値, "act":現在値, "ans":求める変数, "RF, LF, RH, LH, HEAD, BASE, COM, AM, JOINTS":右足, 左足, 右手, 左手, 頭, ベースリンク, 重心, 重心周り角運動量, 対応する関節, である。 $\mathbf{v}_{BASE}^{\text{ans}}$ は具体的には以下のようなベースリンクの並進速度ベクトル 3DOF と角速度ベクトル 3DOF で記述される, ツイストと呼ばれる形式である。

$$\mathbf{v}_{BASE}^{\text{ans}} := \begin{pmatrix} \mathbf{v}_{BASE}^{\text{ans}} \\ \boldsymbol{\omega}_{BASE}^{\text{ans}} \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

またヤコビアンに関しては、 $\mathbf{J}_{RF}^{\text{JOINTS}}$ は全身の可動関節の変化分から右足エンドエフェクタへの影響分を表すヤコビアンであり、 $\mathbf{J}_{RF}^{\text{BASE}}$ は浮遊ベースリンクの 6DOF 位置姿勢の変化分

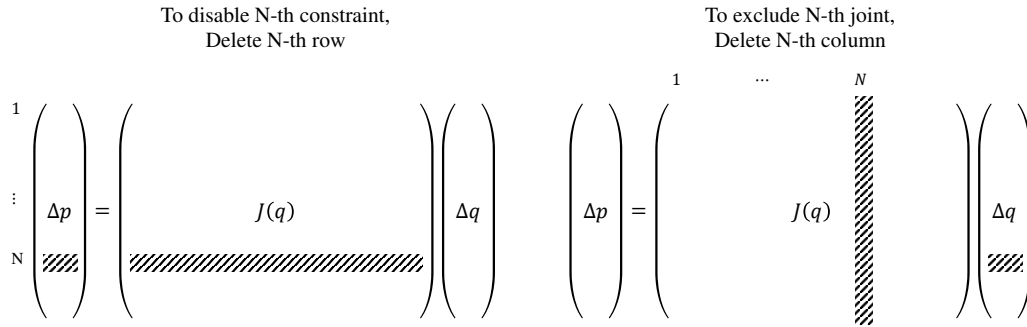


Fig 3.6: Unused constraints and joints reduction

から右足エンドエフェクタへの影響分を表すヤコビアンである。固定ベースリンクのシリアルリンクロボットを扱う文脈ではヤコビアンにベースリンク 6DOF 分が含まれないこともあるので明示的に記述している。この式は制御周期 Δt おきに 1 回 IK を解くという運用を想定した式である。特に、角運動量の差分に Δt が掛けられている点などには注意が必要である。

実際には前述した拘束条件の全てを利用しているわけではなく、Fig. 3.5 の外周に添えた数字のように、一部の自由度の拘束を無効にしている。一部の自由度の拘束を無効にする際は Fig. 3.6 のように該当する行列やベクトルの成分を削除する。本研究では、HEAD は Pitch と Yaw の 2DOF 以外の拘束を削除、BASE は回転姿勢の 3DOF 以外の拘束を削除、角運動量の拘束はすべて削除、目標関節角度の拘束は腕部の 8x2DOF 以外削除している。そもそも対象とするロボットの全身関節 33DOF と浮遊ベースリンク 6DOF を足した自由度よりも拘束条件の数が上回ってしまうため、拘束条件はできるだけ削減した方が好ましい。重心周りの角運動量の拘束は 0 に拘束することで、分解運動量制御のように全身のリンク質量分布により発生する慣性の影響を 0 に近づけることができるが、すでに他拘束条件によって余剰自由度が埋まってしまっているため、基本的に採用していない。このようにヤコビアンを決定する最終段階で一部行を削除する操作により、本来正方行列である表記上の \mathbf{I} が正方行列でなくなってしまうことにも注意されたい。同様に、全身関節自由度の内、一部の関節を IK の影響下から除外することもできるが、本研究では特に除外した関節はない。

最終的に使用する拘束条件と関節を決定したのち逆問題を解いていくが、多くの場合、最終的なヤコビアン $\mathbf{J}(q)$ の形状は正方行列ではないため、疑似逆行列を利用するアプローチを採ることになる。疑似逆行列を生成する過程で重み行列や減衰要素を挿入することで、特異点付近での解の挙動の安定化や、拘束条件の厳密さや関節の変位しやすさに重み付けをすることができる。その中でも解の安定性と収束性の良さを両立している [45] の手法を使う。

$$\Delta \mathbf{q}_k = \mathbf{H}_k^{-1} \mathbf{g}_k \quad (3.12)$$

$$\mathbf{g}_k := \mathbf{J}_k^T \mathbf{W}_p \Delta \mathbf{p}_k \quad (3.13)$$

$$\mathbf{H}_k := \mathbf{J}_k^T \mathbf{W}_p \mathbf{J}_k + \mathbf{W}_n \quad (3.14)$$

$$\mathbf{W}_n := (\Delta \mathbf{p}_k \mathbf{W}_p \Delta \mathbf{p}_k + \bar{w}_n) \mathbf{W}_q \quad (3.15)$$

各変数の意味は以下である。

- $\Delta \mathbf{p}_k$ … kステップ目における，拘束条件に指定されている対象の現在値と目標値の差。
 $\mathbf{p}_k^{\text{ref}} - \mathbf{p}_k^{\text{act}}$ とも書ける。
- $\Delta \mathbf{q}_k$ … kステップ目において得られる次回関節角とベースリンク 6DOF 更新量。 $\mathbf{q}_{k+1} - \mathbf{q}_k$ とも書ける
- \mathbf{J}_k … kステップ目の現在姿勢におけるヤコビアン。
- \mathbf{W}_p … 拘束条件に係る重み。(拘束条件数) × (拘束条件数) の対角行列。大きいほど対応する拘束条件の誤差を少なくする。重心位置や足先位置など重要な拘束条件は重みを大きくすると良い。
- \mathbf{W}_q … 全身関節角とベースリンク 6DOF の変動量に係る重み。(関節数+6) × (関節数+6) の対角行列。大きいほど対応する関節の更新量が小さくなる。体幹の関節などあまり激しく動かしたくない箇所は重みを大きくすると良い。
- \bar{w}_n … \mathbf{H}_k の退化を防ぐ微小バイアス。本研究では $1e-6$ にしている。

特に，マスタ・スレーブ制御のように事前に姿勢の妥当性などを検証できない適用例では，特異姿勢に陥ってしまったり，目標に到達する解が存在しないような状況は十分起きうる。また，ヒューマノイドロボットにおいては，高優先度な重心位置と，低優先度な手先位置やカメラ姿勢などが共存するため，可解性にロバストかつ優先度を設定できる逆運動学手法が不可欠である。

3.4.2 Spline 補間による関節速度制限を考慮した運動生成

等身大ヒューマノイドロボットや大型産業用ロボットにおいては，リンク構造体の慣性の影響などが無視できない影響となるため，実行される指令関節軌道は実際のアクチュエータ

の制約を考慮した滑らかな軌道であるべきである。仮にアクチュエータ単体のPD制御などの制御層で安全性が保証されていたとしても、特に等身大ヒューマノイドロボットなどでは、リンクのたわみや接地面の滑りなどを生じる要因となるため、可能な限り指令関節軌道の段階で滑らかな軌道にしたい。

ロボット用の多くのアクチュエータは電流によって力やトルクを発揮するため、主な制約はアクチュエータシステムに入力できる最大電流といえるが、実際はより複雑である。

1. 温度制約

モータードライバ基板上のFETや、モータ巻線、電源配線等に破損を防ぐための定格電流が設定されている理由は、主に導体の抵抗で発生する熱による焼損である。そのため短時間であれば定格電流を超える電流を流しても破損しない。特にヒューマノイドロボットでは大きな定格電流を持つ大型アクチュエータが搭載できないため、積極的に定格電流を超える運用をすることも多い。

2. 電流制約

理論上は各電子部品の焼損さえ防げれば、電流制限は考慮しなくても良いといえるが、一方で、大元となる電源装置には発揮可能な最大電流制限が存在する。家庭用電源で駆動する安定化電源などでは瞬間的に発揮できる電流に限りがあるため、必要に応じてキャパシタやバッテリーを検討する必要も出てくる。

3. 電圧制約

近接した回路間で高電位差が生じると絶縁破壊が起こり、空中放電などが生じるが、それ以前に問題になるのはFETの耐電圧である。特に、アクチュエータシステムの負荷側に対して外部からの衝撃やリンク慣性の影響による急激な逆駆動が生じると、モータ自身の逆起電力によってFETや周辺回路の破壊を起こす可能性がある。

4. トルク・加速度制約

アクチュエータ自身が発揮できるトルクは、アクチュエータに入力できる電流制限に律速されているが、負荷側にかかるトルクはその限りではない。無入力状態でも、加速状態からの急な減速や衝撃力などによる逆駆動によって、ハーモニックドライブのラチェッティングや、タイミングベルトの歯飛びとして問題となる。

5. 速度制約

無負荷回転時のモータでも，自身から発生した逆起電力が入力電圧と拮抗し，いずれは回転数が頭打ちになる．特に高減速比な減速機構との組み合わせで表面化しやすい．また，ハーモニックドライブや歯車，タイミングベルトなどにも運用時に許容される最大回転速度が定められており，それ以上は摩耗などにより寿命を縮めることになる．

温度制約を除き，上記のような制約は主に高速動作時の急な加減速時に問題となるため，指令関節軌道を全体的に減速させてしまえば問題を回避することは可能だが，現状のヒューマノイドロボットが人間のパフォーマンスを再現するためには，アクチュエータシステムの能力を最大限活用せざるを得ない．ただし，上記の制約をすべて考慮することは現実的ではなく，実際には，速度，加速度，トルクあたりを指令関節軌道生成時に考慮することが多い．しかし，速度に関する制約を課すことは容易である一方，加速度やトルクに関する制約を満たすためには，ある程度の時系列データを用いて動力学演算をとともう最適化を行うアプローチを採らねばならない．

本研究では，実時間で信頼性のある軽度な処理によってアクチュエータ制約を満たせるよう，トルク制約は無視し，速度制約に注目した3次スプライン補間を用いて全身の関節指令値を生成する．

まず，Spline 補間の基本式を記す．現在時刻を $t=0$ とし，補間区間を $t=0\sim T$ とおくと，スプライン補間は任意の係数 $a_0\cdots a_N$ を用いて，以下の多項式のように書ける．

$$f(t) = a_N t^N + \cdots + a_1 t + a_0 \quad (3.16)$$

とくに，3次スプライン (Cubic spline) の場合は以下のようなになる．

$$f(t) = a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (3.17)$$

この一般式に対して，本研究では現時刻 $t=0$ における現在状態 q_i ， \dot{q}_i から，ある安全な時刻 T 秒後における目標状態 q_i^{ref} ， 0 に到達するとすると，境界条件は以下のようなになる．

$$f(0) = q_i \quad (3.18)$$

$$f'(0) = \dot{q}_i \quad (3.19)$$

$$f(T) = q_i^{\text{ref}} \quad (3.20)$$

$$f'(T) = 0 \quad (3.21)$$

これを (3.17) に適用すると、各係数が以下のように定まる。

$$a_0 = q_i \quad (3.22)$$

$$a_1 = \dot{q}_i \quad (3.23)$$

$$a_2 = \frac{-3q_i + 3q_i^{\text{ref}} - 2\dot{q}_i T - \dot{q}_i^{\text{ref}} T}{T^2} \quad (3.24)$$

$$a_3 = \frac{2q_i - 2q_i^{\text{ref}} + \dot{q}_i T + \dot{q}_i^{\text{ref}} T}{T^3} \quad (3.25)$$

次に補間時間 T の決定法を説明する。補間時間 T は短か過ぎれば急峻な動きとなり実行できず、長すぎれば応答性の悪い動作となってしまふ。ここでは i 番目のアクチュエータが発揮可能な平均最大速度を V_i^{avg} 設定することで T を決定する。平均最大速度での速度制限の意味は、瞬間的にはその速度を超えることもあるが、ある時間区間内の平均速度は制限内にあるという意味である。現在関節角と目標関節角度を用いて、 T を以下のように見積る。

$$T_i = \frac{|q_i^{\text{ref}} - q_i|}{V_i^{\text{avg}}} \quad (3.26)$$

$$T = \max\{T_0, \dots, T_{N-1}\} \quad (3.27)$$

上式の T は、各々の関節ごとのに設定された平均最大速度から計算された T_i の内、最大のものを選択していることになる。この T を全ての関節に共通の補間時間とすることで、各関節間での目標位置への到達予定時刻を合わせつつ、全関節の平均最大速度制約を守るようになる。

実際には、毎制御周期で逐次再計算しながら次の出力関節角を決定するので、やや複雑になる。まず、Fig. 3.7 左のように、時刻 $t = t_k$ における現在状態と目標状態から補間時間 T を算出する。次に補間時間 T を用いて暫定の全身補間軌道を生成するが、実際に次の出力関節角として使用されるのは、補間軌道の最初の 1 ステップ目 $q_i(t_{k+1})$ だけとなる。これらを

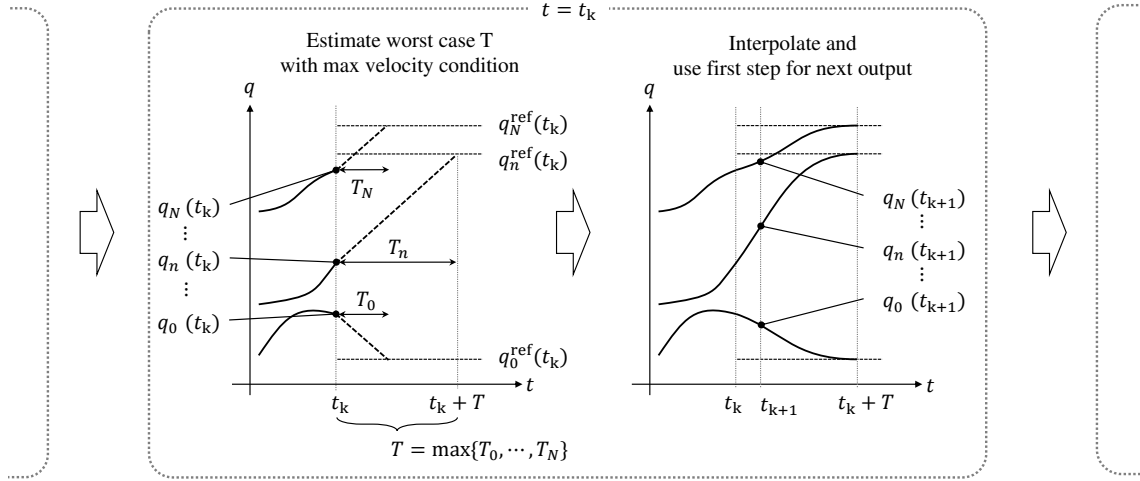


Fig 3.7: Sequential joint trajectory interpolation with cubic spline

式に表すと以下のようなになる。

$$a_0(t_k) = q_i(t_k) \quad (3.28)$$

$$a_1(t_k) = \dot{q}_i(t_k) \quad (3.29)$$

$$a_2(t_k) = \frac{-3q_i(t_k) + 3q_i^{\text{ref}}(t_k) - 2\dot{q}_i(t_k)T(t_k) - \dot{q}_i^{\text{ref}}(t_k)T(t_k)}{T^2} \quad (3.30)$$

$$a_3(t_k) = \frac{2q_i(t_k) - 2q_i^{\text{ref}}(t_k) + \dot{q}_i(t_k)T(t_k) + \dot{q}_i^{\text{ref}}(t_k)T(t_k)}{T(t_k)^3} \quad (3.31)$$

$$T_i(t_k) = \frac{|q_i^{\text{ref}}(t_k) - q_i(t_k)|}{V_i^{\text{avg}}} \quad (3.32)$$

$$T(t_k) = \max\{T_0(t_k), \dots, T_{N-1}(t_k)\} \quad (3.33)$$

$$q_i(t_{k+1}) = a_3(t_k)\Delta t^3 + a_2(t_k)\Delta t^2 + a_1(t_k)\Delta t + a_0(t_k) \quad (3.34)$$

Δt は制御周期で $t_{k+1} - t_k$ に等しい。

この手法は Fig. 3.8 左のように、指令値が急変する場合には正確さを失いながら関節の最大速度付近を發揮しつつ追従するが、Fig. 3.8 右のように指令値がゆっくり移動する場合には Point-To-Point (PTP) 制御のように各点を正確に辿ってゆく。人間も同様に、高速なスイング動作をする場合には関節の最大速度を重視して途中経路は特に意図せず、丁寧な物体操作をする場合にはゆっくり手先の経路を意識しながら動作するため、この手法は人間の動作の特性を過不足なく反映できるといえる。

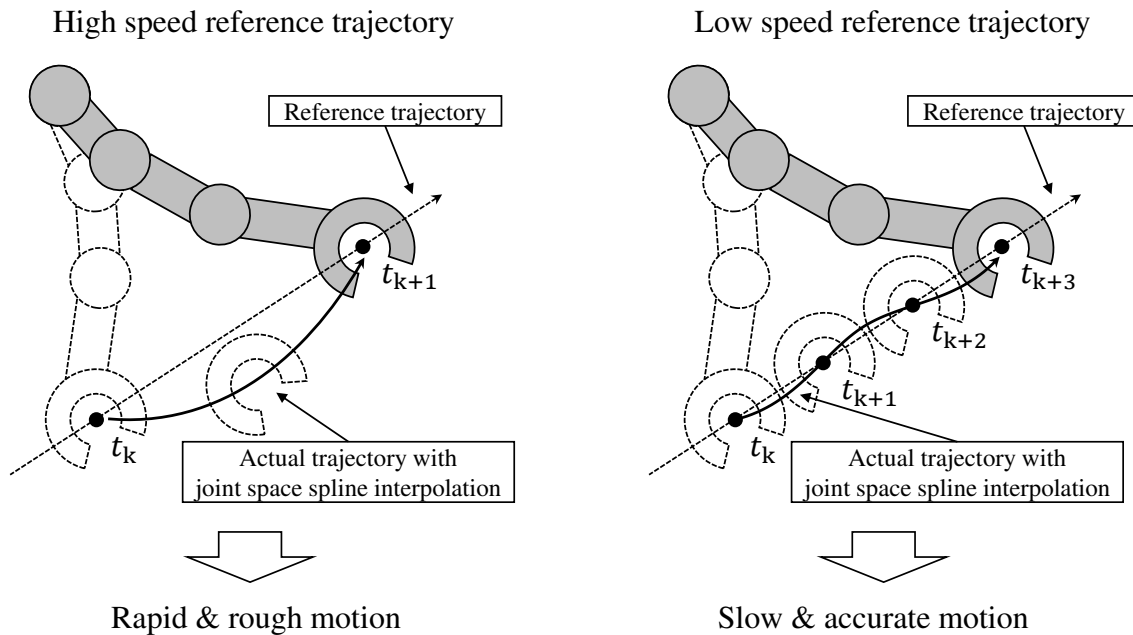


Fig 3.8: End effector motion speed and accuracy can be compatible with joint space spline interpolation method, but those are trade-off

この手法は大まかに関節速度制限を守るように毎制御周期スプライン補間を再計算しているだけであるが、究極的にはモデル予測制御 (Model Predictive Control, MPC) に行き着く問題ではないかと考える。この全身関節をいかに安全に補間するかという問題の特徴は以下のように整理できる。

1. 電流入力のモータによるアクチュエータの加速度運動は、線形時不変の系として状態方程式で記述できる。
2. 可動域，速度，加速度に関して不等式制約条件を持つ。
3. 制約条件内で最速で目標値に収束したい
4. 毎時刻，目標値が更新される。
5. 全身関節間で整合性をとる必要があるため，多入力多出力系 (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) である。

これらの要求仕様を単純な PID 型の追従軌道やローパスフィルタの適用によって達成するこ

とは難しく、もちろん解析的にも解けない。上記のような制約条件付きの最適問題を逐次更新するために有効な手法がMPCである。MPCにはいくつか種類があるが、この問題に適用する場合は、毎時刻の現在状態、目標状態、不等式制約条件を既知として、将来の数秒分のReceding Horizon区間に対して制約条件付きQPを解き、その解軌道の最初の1フレームのみを次の制御出力として出力するという戦略になる。

将来の数百フレーム分の状態量に対してQPを適用するので計算量が多くなる傾向にある。本研究で用いたSpline補間による逐次更新手法は、MPCにおいてQPを用いて最適軌道を生成する部分を、簡易的な速度制約のみを考慮した3次Splineで置き換えたものに相当し、計算量に限りの有る数百Hzの関節制御において妥当な手法とも考えられる。

3.5 二脚動力学アシストシステムと従来手法に関する議論

ここまで述べたDCM/CCMによる重心速度制限と、指令値/実測値のDCM,ZMPを用いた自動遊脚接地制御は、リアルタイムで入力される操縦者の重心軌道/足先軌道入力を重心-ZMP系としてFeasibleな軌道に修正する力学フィルターに近いアプローチとして説明できる。力学フィルターの一例として、山根らのDynamics Filter [46]はリアルタイムに入力される環境との接触拘束や、人間の関節角軌道、重心軌道に対して、PD制御のように追従しつつ接触拘束からFeasibleな関節加速度を、最小二乗法などを利用して近傍解を求める。接触拘束条件を満たす加速度を生成するだけでは加速度的に姿勢が発散していくことも考えられるため、何らかの目標に追従する仕組みが必要であるが、山根らのDynamics Filterでは入力の関節角や重心軌道にPD制御のように収束することで実現している。そのため、この手法ではある程度入力がFeasibleなものに近いことが要求されており、山根らによって“グローバルな最適化を行わないため、運動が安定に継続できる保証がない”と言及されている[47]。また、入力される接触拘束の情報に対しては修正を行わないため、遊脚接地のタイミングなどの整合性は入力情報に強く依存している。それに比較して本手法は重心-ZMPモデルにおけるDCM/CCMと支持領域の制約を厳密に守るため、たとえ入力姿勢が転倒するような重心軌道であっても、大域的な重心と支持領域のFeasibilityが破られることはない。また、遊脚の接地や離地のタイミングも自動判定するため、入力足先軌道が乱雑であったり、実機ロボットにおいて微小な外乱があった場合にも転倒を防ぐことができる。本手法はより脚運動に特化した力学フィルターと位置付けられる。

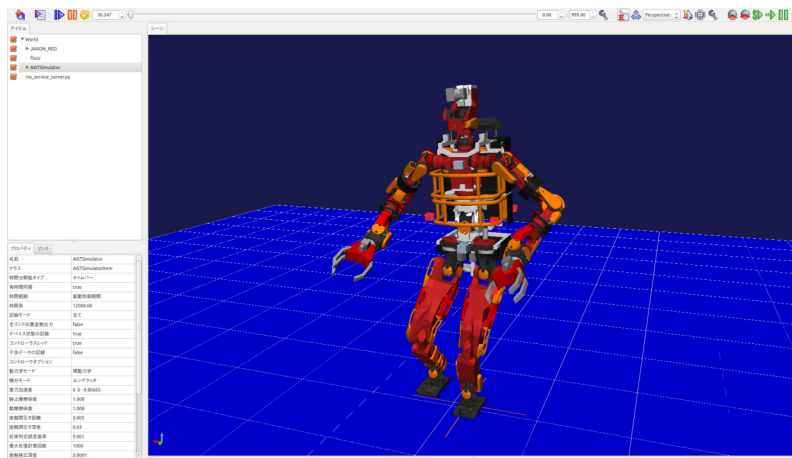


Fig 3.9: Humanoid robot forward dynamics simulation with Choreonoid

3.6 二脚動力学アシストシステムの有効性検証

3.6.1 動力学シミュレーションによる二脚動力学アシストシステムの有効性検証

まず、前述の二脚動力学アシストシステムの有効性を動力学シミュレーションを通して検証する。動力学シミュレーション環境として Fig. 3.9 の Choreonoid[48] を使用する。実時間で動作する順動力学シミュレーションに対して Fig. 3.10 のように Open Real Time Middleware (OpenRTM)[49] と Robot Operation System (ROS)[50] を併用した、RTM-ROS 相互運用システム [51] を介して検証用のサンプル指令値を送信する。OpenRTM においてプログラムは Real Time Component (RTC) として実装され、特にヒューマノイドロボット用の RTC を集めた RTC 群は hrpsys[52] と呼ばれる。二脚動力学アシストシステムはこの hrpsys の RTC の一つとして実装される。このソフトウェア構成は後述の実機ヒューマノイドロボットの制御ソフトウェア構成と互換になるよう構成されている。

順動力学シミュレーション環境内で動作するヒューマノイド全身操縦システムに対して、徐々にその場足踏みの周期が速くなるような仮想の重心-足先指令値を与え、どこまで高速な足踏み入力に耐えられるかを検証したものが Fig. 3.11 ~ Fig. 3.13 である。凡例中の“master XXX ref pos”は重心と両足の目標値であり、この検証では単純な矩形波としている。全体に共通する主要な諸元は、平均最大足下げ速度 0.4 m/s、Y 方向重心揺動制限範囲 -0.09 ~ 0.09 m、重心位置に対するローパスフィルタカットオフ周波数 1.2 kHz、である。まず、Fig. 3.11 では DCM/CCM による重心速度制約も重心位置に対するローパスフィルタも適用していないため、

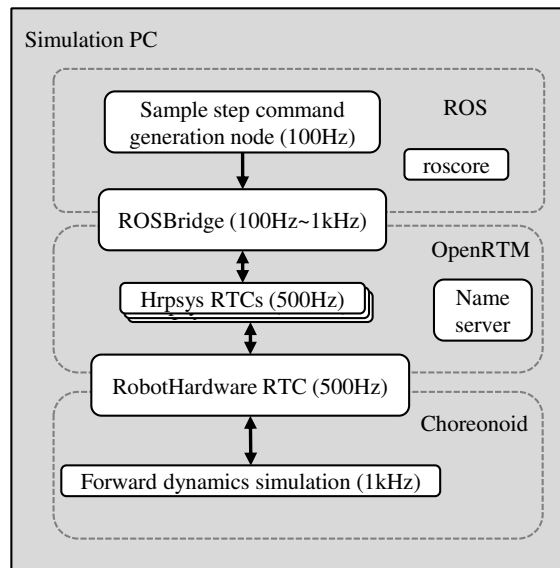


Fig 3.10: Software connection of the master-slave forward dynamics simulation

不連続な矩形波状の重心軌道をそのまま実行してしまい即時転倒している．次に Fig. 3.11 では DCM/CCM による重心速度制約を適用せず，重心位置に対するローパスフィルタのみを適用している．このケースでは低速な足踏み指令時には転倒せず足踏みを実行できているように見えるが，足踏み指令周波数が 0.4 Hz に近付いたあたりで転倒している．このことから重心軌道を単純に平滑化するだけでは正しい重心運動の制約として機能しないことがわかる．最後に Fig. 3.13 は DCM/CCM による重心速度制約を適用したのち，重心位置を平滑化したものである．シミュレーション内で操縦されているロボットの足上げ高さである “slave XXX act pos Z” から分かるように，実際に足踏み運動として実行されている目標足踏み周波数は 0.3 Hz までではあるが，それ以上の足踏み周波数には強制遊脚接地制御によって強制的に両足支持状態が続くものの，重心を小さく揺動するのみで転倒安全性が保たれている．また，足裏の垂直反力である “slave XXX act force Fz” を Fig. 3.12 と比べると，スパイクの立ち上がりが少ないことから，より理想的な足踏みを実行できていることがわかる．また，目標足踏み周波数 0.3 Hz 以上の区間も足裏垂直反力は同様に触れていることから，遊脚を上げるには至らずとも体重移動，すなわち ZMP の揺動は適切に行われていることがわかる．

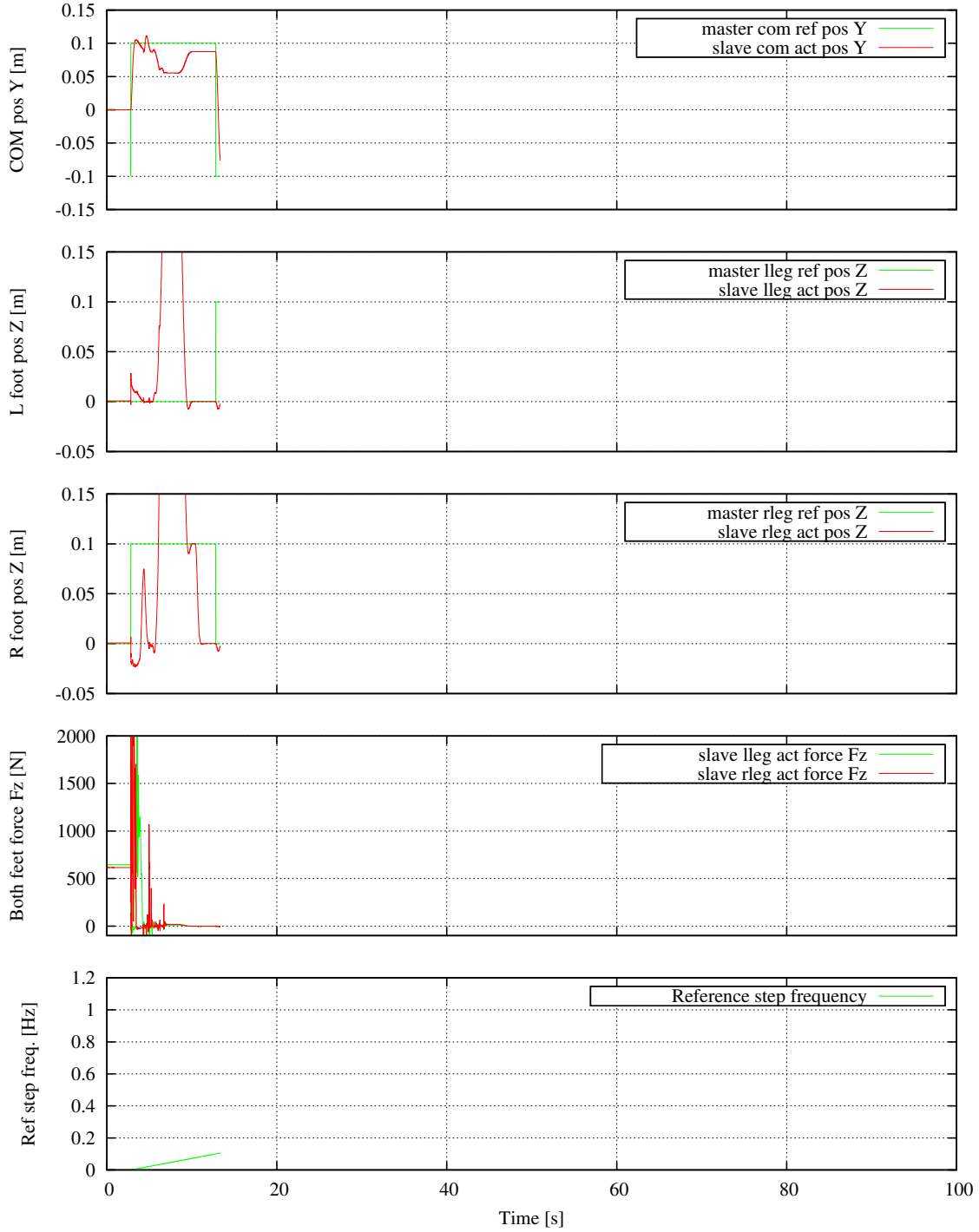


Fig 3.11: Sample step motion simulation with no com limitation

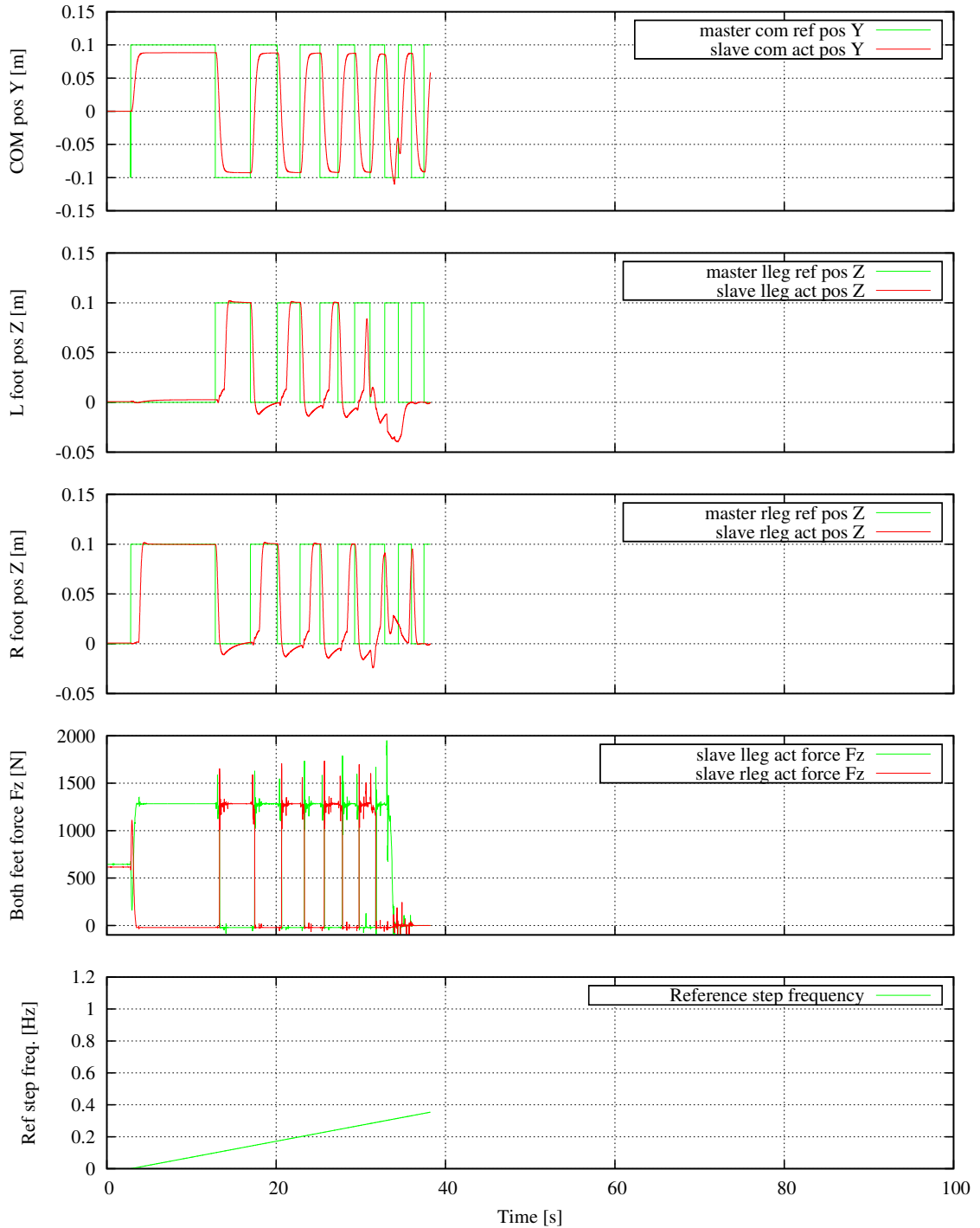


Fig 3.12: Sample step motion simulation with only com trajectory smoothing

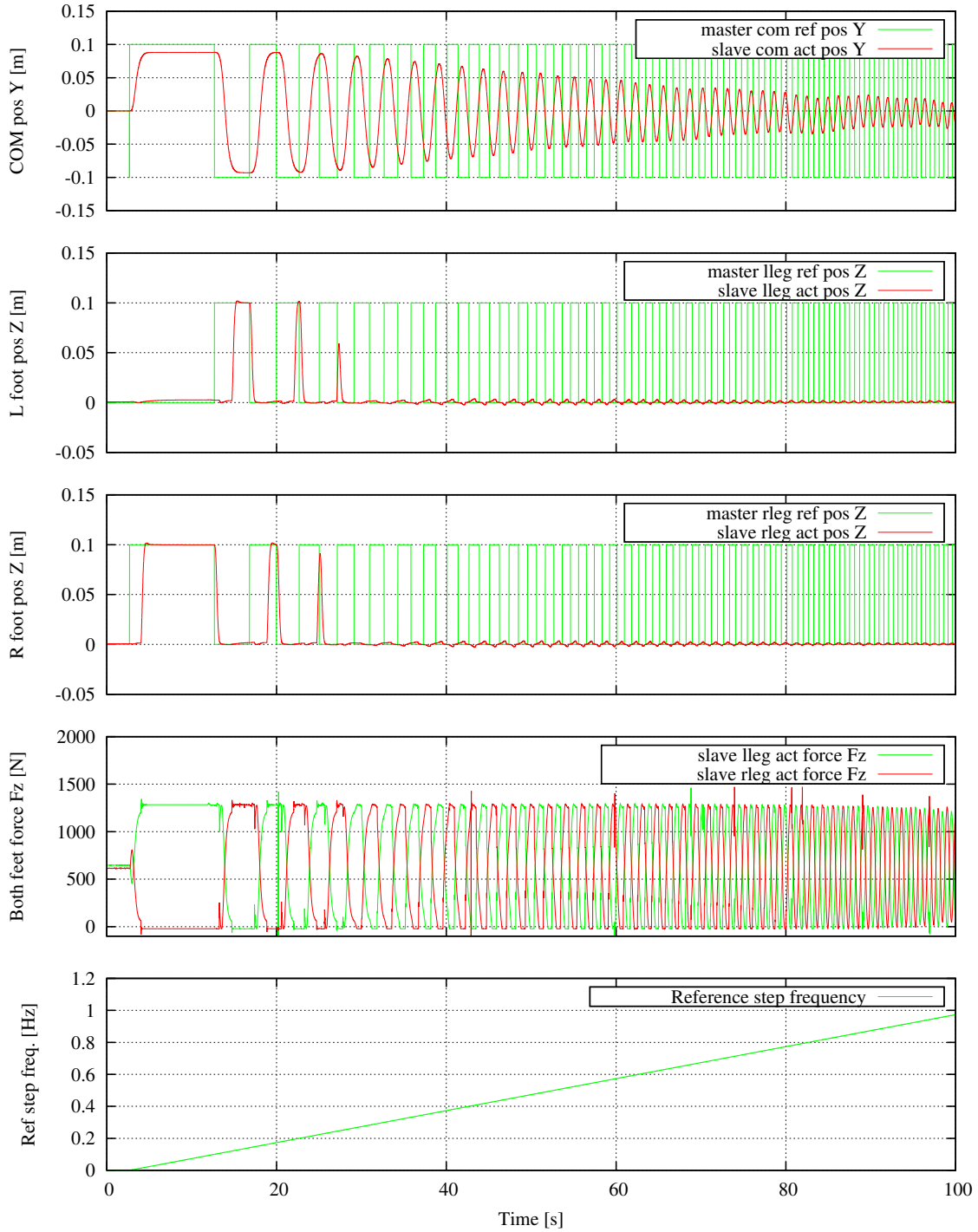


Fig 3.13: Sample step motion simulation with DCM/CCM based com velocity limitation and com trajectory smoothing

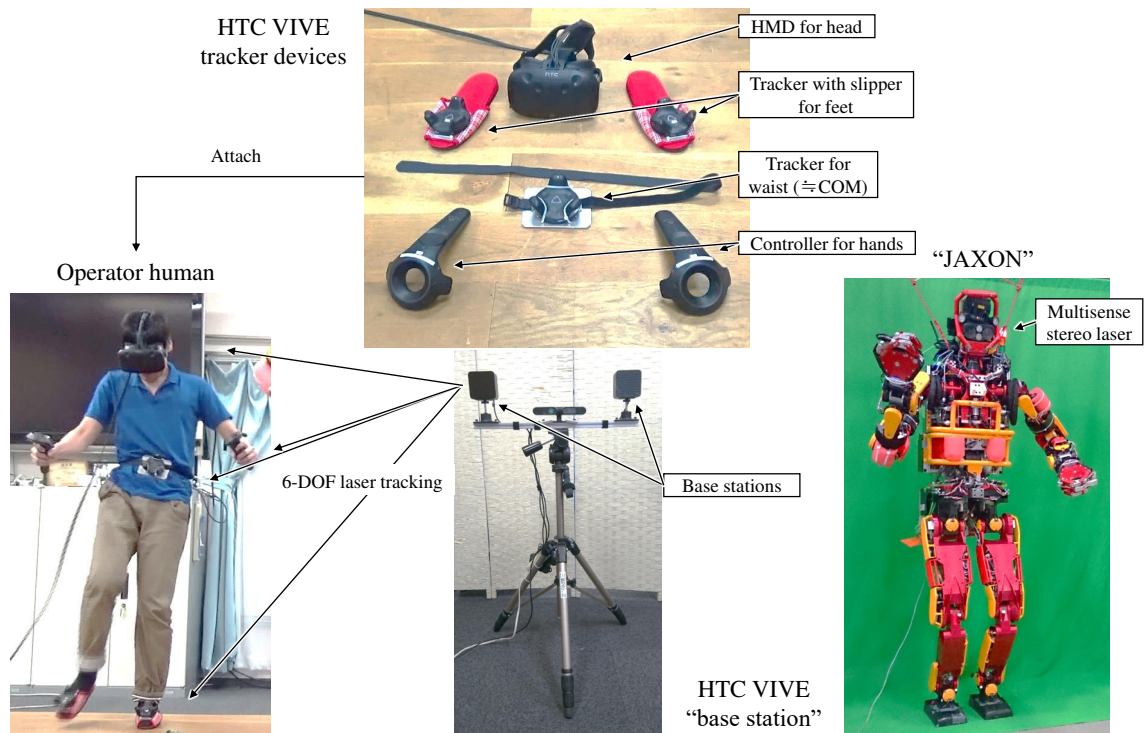


Fig 3.14: Main hardware components in the experimental master-slave system

3.6.2 マスタ・スレーブ型操縦システム構成

ここまで説明した二脚動力学アシストシステムの有効性を実際のロボットシステムにおいて検証する。ここで説明する操縦システムは操縦者の全身姿勢を対象ロボットにユニラテラルに送信するマスタ・スレーブ型操縦システムである。操縦者の全身姿勢は Fig. 3.14 中の HTC VIVE によって取得する。HTC VIVE は外部のベースステーション (base station) から周期的に走査されるレーザー光を、各デバイスに搭載された複数の受光部で検出し、レーザー光の検出時刻のズレから各デバイスの位置姿勢を推定する [53]。また、内部に搭載された IMU の情報も併用して精度を上げていると言われている。これらのデバイスを操縦者の身体に装着することで、手先、足先、体幹、頭の位置姿勢を計測する。この計測方法で操縦者の重心位置を正しく計測することは出来ないが、人体の重心はへそ付近であることから、体幹の腰部に装着したトラッカーの位置を重心位置とみなす。操縦対象のロボットは高速大出力ヒューマノイド “JAXON” [54] とする。JAXON は水冷モーター駆動システムの導入により大出力を発揮できることも特徴であるが、腰部の 3 自由度と腕部の 8 自由度の関節構造に

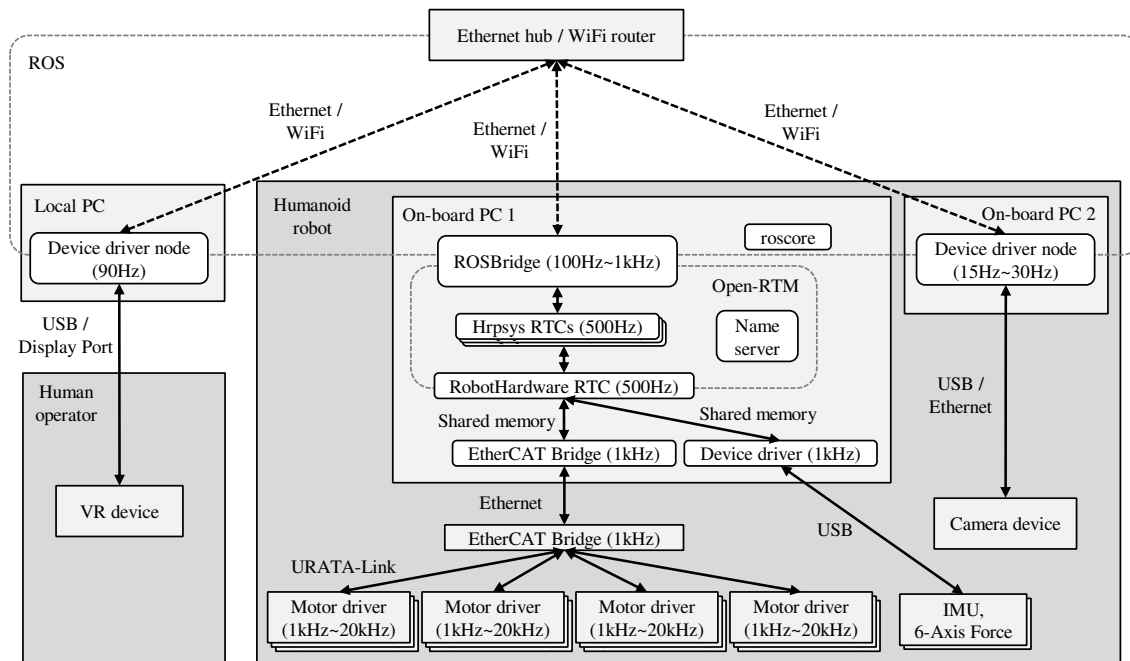


Fig 3.15: Software and network connection of the master-slave system

より，人体の柔軟な運動の再現に適性を持つ。

ソフトウェアシステムの詳細を Fig. 3.15 に示す．図中“Humanoid robot”は本章の実験においては JAXON を想定して説明する．JAXON は Open Real Time Middleware (OpenRTM)[49] と Robot Operation System (ROS)[50] を併用した，RTM-ROS 相互運用システム [51] が採用しており，hrpsys の RTC には指令関節角補間 (SequencePlayer)，歩容生成 (AutoBalancer)，足裏反力制御 (Stabilizer)，干渉検出 (CollisionDetector) などが含まれ，これらは同一プロセス内で直列に同期処理され，最終的に関節角指令値やトルク指令値を出力する．hrpsys を実行する PC のハードウェア要件にもよるが，JAXON においては hrpsys を 500Hz で周期実行している．hrpsys は共有メモリやデバイスドライバプログラムを通じてロボットのモータードライバ群やセンサデバイスと通信している．一方で，可視化用のデータ通信や，カメラデバイス等の通信はリアルタイム性を必要としないため，ROS における ROS ノードとして実装され，非同期に処理されながら相互通信している．可視化用のデータにはセンサから計測した 6 軸力や関節角の実測値なども含まれるため，ROSBridge[52] が hrpsys の RTC と接続することで ROS ネットワークへ仲介している．ROSBridge は RTC としてのコードと

ROS ノードとしてのコードが共存しており，ROS と OpenRTM の両方と通信できる．ただし，ROSBridge 自体はロボットの身体制御に深く関わらないため，hrpsys の RTC 群とは別プロセスで非同期に実行されている．マスタ・スレーブ用の操縦者姿勢データは ROS のネットワークから送信され，ROSBridge を介して hrpsys 内の RTC に非同期で入力されることとなる．

3.6.3 二脚力学アシストによる安全な全身操縦の実現

力学アシストシステムを有効にした状態でマスタ・スレーブ制御によって脚運動を実行した際の各種データのグラフが Fig. 3.16 である．上段の 2 つのグラフが脚運動にかかわる主なデータのグラフであり，下段の 2 つが足上げ高さのグラフである．“Input front RF” は操縦者の入力姿勢における右足の支持領域の前端を意味し，“Modified front RF” はその修正後の値を意味する．脚軌道に関しては設計通り，入力値に対して修正値は滑らかかつ，地面に対して緩やかに接地するような軌道になる．重心位置，DCM/CCM についても設計通り，支持領域の X-Y 端内に収まるように変遷していることがわかる．このグラフ中には操縦者の実測入力値から，ロボットに出力する直前の指令値までのみ含まれており，IMU による絶対座標系における重心位置や，力センサによる実測 ZMP などは含まれていない．“Input COM” から “Modified COM” までのおおよその遅延をグラフから読み取ると，0.6s 程になっていることがわかる．Fig. 3.17 は Fig. 3.16 の 3 次元プロットである．このアシスト機構は Fig. 3.18 や Fig. 3.19 のような動作を実行する際に有効に機能する．

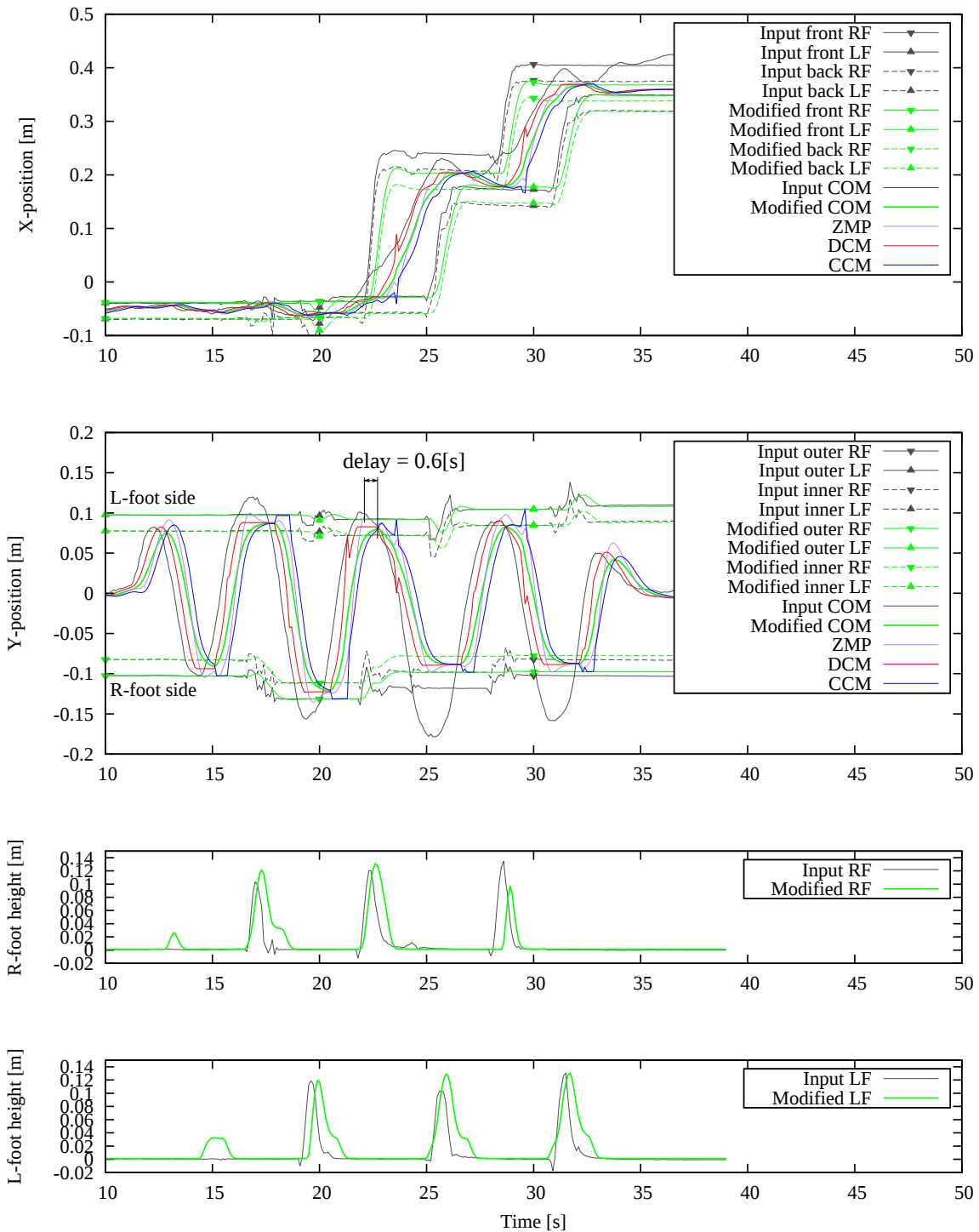


Fig 3.16: 2D detail plot of the actual tracked human data and executed robot data: in this plot, we must assume the tracked human motion doesn't include the foot pose rotation. The COM and its both CP stay between the both feet at any time

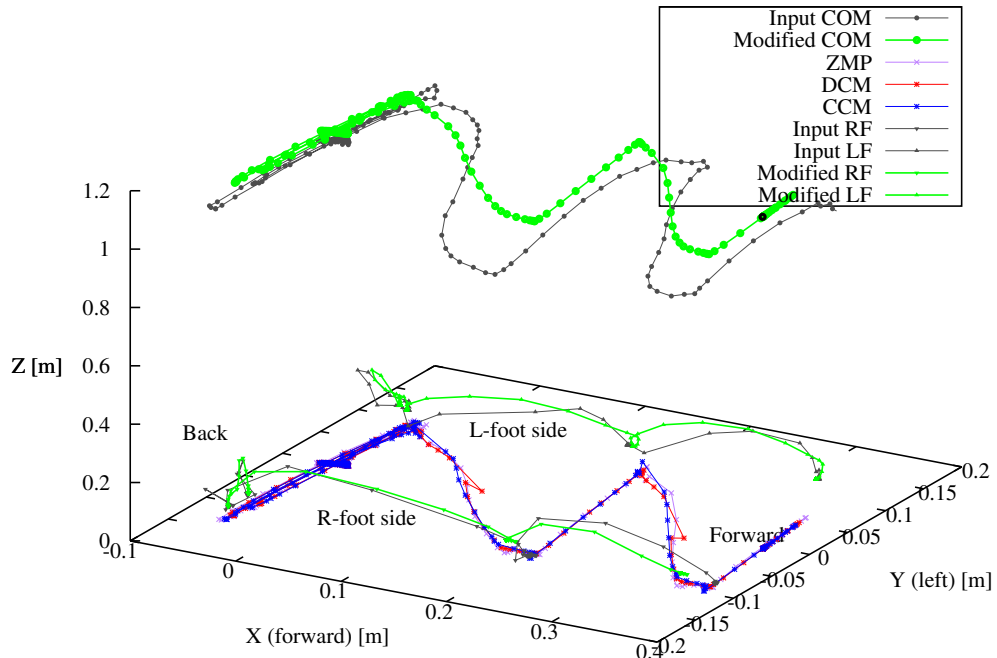


Fig 3.17: 3D overview of the actual tracked human data and executed robot data: in this data, the human swings his COM and step on the initial place, after that walks forward for 4 steps

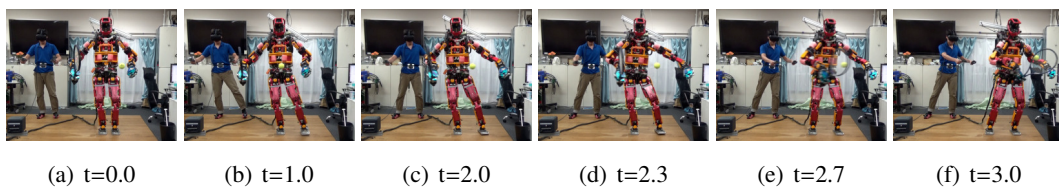


Fig 3.18: Tennis swing experiment with a racket and image feedback to the operator

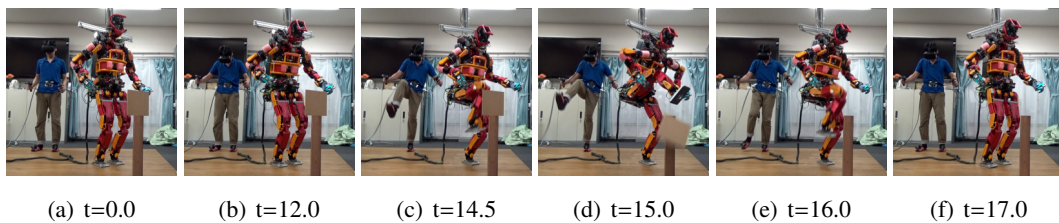


Fig 3.19: High speed high kick motion execution with real time whole body master-slave humanoid system: the target wooden plate is put on the 60 cm height pole fixed on the ground

3.7 本章のまとめ

本章ではヒューマノイドロボットの全身をリアルタイムでマスタ・スレーブ制御するために導入したいくつかの手法について説明した。「DCM/CCMに基づく重心速度制限による二脚動力学アシスト」は重心の動的な運動を維持しつつ足裏支持領域内で停動できるように制限するために導入した。「自動化された遊脚接地制御」は操縦者の不正確な運足タイミングに依らず安全に遊脚接地を満たすために導入した。「エンドエフェクタ空間と関節空間でロバストな運動学」は対象ロボットの運動能力を超える操縦入力が行われた場合にも安全に最大限追従できるように導入した。これらは操縦システムの評価指標である、操縦性、安定性、操舵反力特性のうち、安定性を向上させることで、操縦者にとっての操縦難易度を下げ、結果的に操縦パフォーマンスを向上させるための要素として機能する。これらはシミュレーション検証によって原理的な有効性が示され、実機システムにおける通常の歩行動作や高速なスイング動作、ハイキック動作などを通じて実用性が示された。

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

4.1 はじめに

本章では、ヒューマノイドロボットの全身操縦システムの物理インターフェースとして機能する、搭乗型全身外骨格コックピットの構成法について述べる。この物理インターフェースは、操縦システムの評価項目である、操縦性、安定性、操舵反力特性、の内の操縦性と操舵反力特性を向上させる要素である。商用化されている簡易的なものから、研究中や構想段階のものまで含め、適切な操縦性と操舵反力特性を達成するために物理インターフェースに求められる要件を議論し、実装する。

4.2 人型全身操縦に適した操縦インターフェース

4.2.1 全身用操縦インターフェースにおける操縦性と操舵反力特性

人型の操縦対象に対してとることの出来る入力方法は、Computer Graphics や Virtual Reality の分野にまで対象を広げれば、いくつかの前例があり、商用化されているものもある。2.4.3 節で述べたように、多自由度なヒューマノイドの全身の操縦性を議論する際には、四肢の同時操縦が可能なインターフェースが前提となる。また、安定性に関しては被操縦側のヒューマノイドロボットの姿勢制御プログラムや、第3章で述べたようなアシストソフトウェアが担うものであるため、操縦インターフェースのハードウェアに関して議論することはない。よって、以降は特に操舵反力特性に関して議論することとなる。操舵反力特性、または操舵感、操縦感には感性的な評価が含まれることもあるが、操縦インターフェースのハードウェア設計に臨む際には、以下のように細分化した評価指標に着目して議論を進める。

- 能動的・受動的反力提示
- 操舵自由度
- 操舵ストローク

能動的・受動的反力提示は、自動車のハンドルを例に挙げると、ハンドルを握ることによって円周上に両手が拘束される現象はハンドルのハードウェア形状による機構的な拘束を受動的な反力提示と分類し、Drive-By-Wire や Steer-By-Wire の電子制御システムに組み込まれたアクチュエータによるハンドルへの操舵反力提示を能動的な反力提示と分類する。傾向として、特定の用途や低コストが要求される場合には専用設計された形状の受動的操縦デバイ

スでも十分な効果が得られるが、より高度な反力提示を行うためには能動的な反力提示が可能なデバイスである必要がある。

操舵自由度は、その操縦デバイスによって操縦が可能な自由度であり、自動車のハンドルであれば1自由度、航空機の操縦桿であれば Roll, Pitch の2自由度である。ヒューマノイドロボットの特に手先に関しては多種多様な作業が想定されるべきであり、操舵自由度は6自由度確保すべきである。

操舵ストロークは、自動車のハンドルであれば最大回転角であり、アクセルであれば最大踏み込み量が相当する。航空機の操縦桿においては大きな可動ストロークを持たせて変位量を検出するものと、ほとんどストロークが無い状態でパイロットが加えた外力を検出するものなどのバリエーションがある。操舵量とその操舵によって制御される物理量の関係は、位置-位置の関係だけでなく、位置-速度、位置-推力、など多岐にわたるため、どのような対応関係に設計することが操縦者にとって好ましいか一概に議論は出来ないが、傾向として、非線形な対応関係や、極端に比率の異なる位置-位置の対応関係などは、扱いづらいものとして評価される。等身大ヒューマノイド操縦では操縦者の四肢の操舵変位と、被操縦側のヒューマノイドロボットの四肢の動作変位が1対1であることが好ましく、卓上デバイスやマリオネット型の操縦手法は、操舵ストロークの観点でデメリットを持っていると言える。

4.2.2 良好な操舵反力特性を再現する全身用操縦インターフェースの形態

まず、最も簡易な例は Fig. 4.1 中 (a) のように、地上に立位状態の操縦者に対してモーションキャプチャに類する手法を用いて姿勢を計測する [55]。この手法は人間の全身動作を制御入力として利用する際に最も利用され易いが、操舵反力提示が無いため、物体を操作している感覚が操縦者に伝わらず、作業がしづらい、また遠隔作業中に目標姿勢を維持し続ける必要があるため、操縦者への負担が高い。また、歩行運動時には操縦者自身も移動してしまうため移動範囲が限られる。これは操縦対象と操縦者自身の歩行移動ストロークを忠実に1対1に設定した結果であるが、本来、操縦対象の歩行移動量に限度はないため、実用的には何らかの工夫が必要である。

(b) は VR ゲーム用のデバイスであり [56]、摩擦の少ない床上に操縦者の体幹を固定することで、操縦者はその場にとどまりながら滑るように無限平面上を疑似的に歩行でき、(a) の欠点を克服している。ただし、実際の地面に接地拘束を受けながら歩行する場合は、Fig. 4.2 の上段のように両足の相対関係や重心移動が整合性を持って遷移するが、空中に半固定された

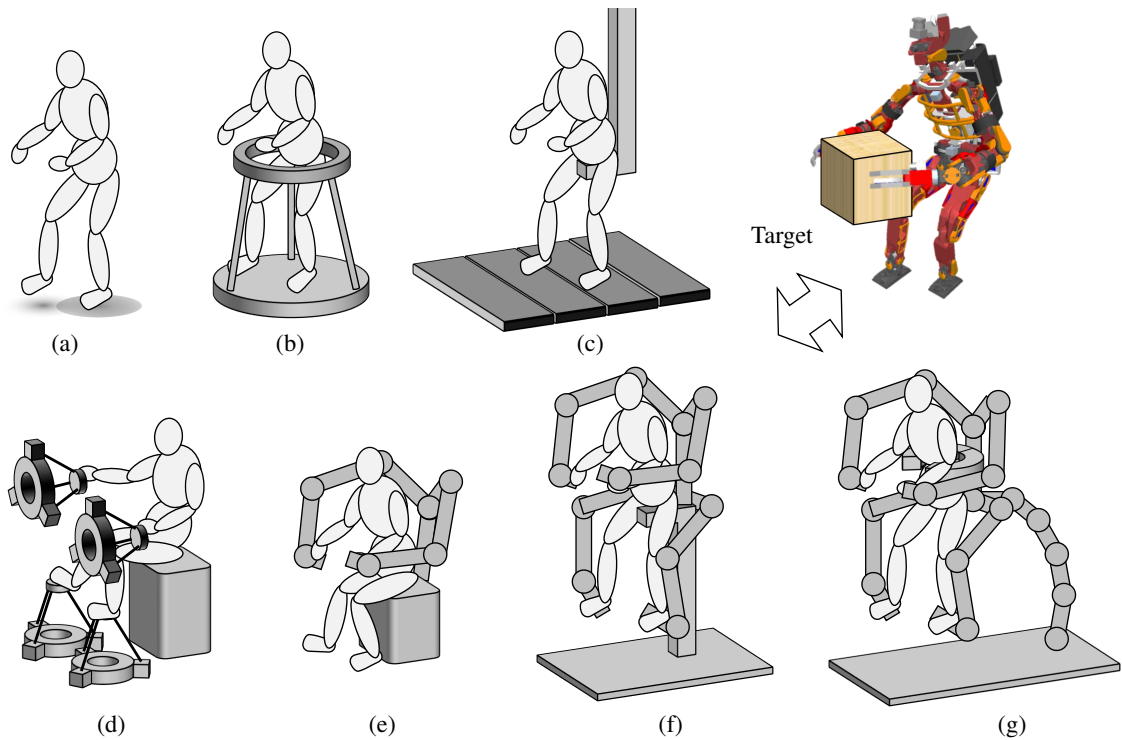


Fig 4.1: Several fullbody human motion input devices

状態で滑りながら足運びをする場合は、注意して意図的に努めない限り Fig. 4.2 の下段のように、本来の歩行とは違う足運びになる。これは両足の平面接触拘束を受動的なデバイスによって疑似的に再現しようと試みた結果である。

(c) はトレッドミル型の歩行デバイスの発展形であり [57, 58, 59]，VR ゲーム用に展開されている [60]。地面が2次元トレッドミルのような能動的装置で構成されており，(b) の例に比べてより自然な歩行入力が出る。ただし，装置は大規模になることと，このアプローチを3次元に拡張することには限界がある。

(d) は四肢にカフィードバック可能なハプティクスデバイスを対向させて設置したものである [61]。図中で図示しているものは商用化されているデルタ型のハプティックデバイスである。ハプティックデバイスとして，パラレルリンク型のデバイスはリンク機構を軽量かつ高剛性に設計しやすく適している。ただし，エンドエフェクタの可動ストロークは小さくなる傾向にあり，図のように操縦者と対向して設置される入力デバイスが操縦者の四肢の運動をすべて包含するためには，巨大な機構を要する。

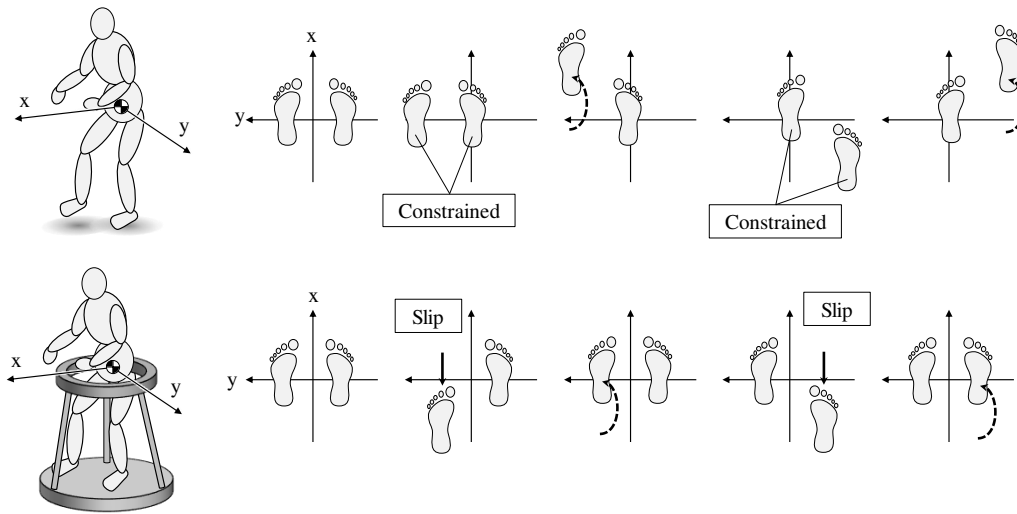


Fig 4.2: Comparison between natural constrained walk and slipping unconstrained walk

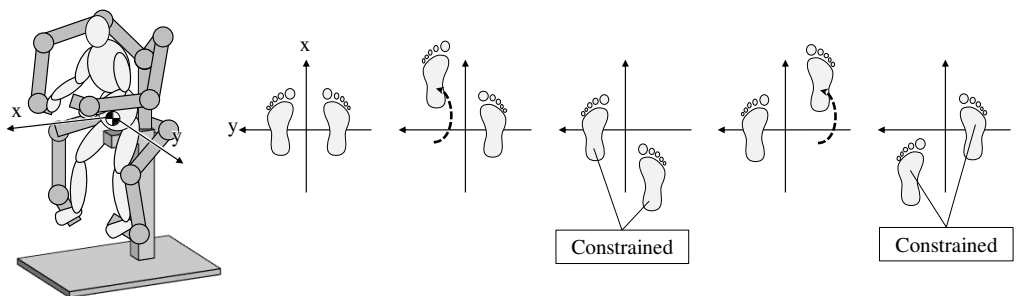


Fig 4.3: Lower limb cockpit exoskeleton can reproduce ground constraint except natural COM swing

(e) は外骨格型のシリアルリンクデバイスを操縦者の身体に沿うように配置したものである。従来から遠隔操縦の背景においてよく研究されてきており [16, 62], 主に操縦者にカフィードバックを適用することを目的としている。操舵反力提示と操舵ストロークの観点からも一つの理想的な形態であるが, 下肢の操縦入力は注目されておらず, ペダル入力や (b) のように地面上を滑るような疑似的な動作入力で行う場合が多い。座位のままで長時間の作業に耐えうる可能性があるが, 脚腕協調の全身運動を円滑に行えないため移動を伴う全身作業の効率が落ちる。

(f) は全身用カフィードバックデバイスとして (e) を拡張したものとなる。下肢部のカフィードバックにより, 仮想平面上を無限に歩行するような能動的な反力提示も可能であり, 仮想3次元環境にも拡張できる。ただし, (c) と同様に体幹は座席を介して環境に固定されるため,

Tab 4.1: List of each device type specification

	type	ground haptics	hand haptics	fullbody dynamics	costs
(a)	stand	2D Passive	None	Passive	Low
(b)	slip base	2D Passive	None	None	Low
(c)	treadmill	2D Active	None	None	Medium
(d)	haptic devices	3D Active	Active	None	High
(e)	upper exoskeleton	2D Passive	Active	None	High
(f)	fullbody exoskeleton	3D Active	Active	None	High
(g)	all DOF exoskeleton	3D Active	Active	Active	Very High

Fig. 4.3 のように仮想平面により自然な歩行に近い両足間の拘束を再現できるものの、人間の歩行時における左右方向の重心揺動などは意図的に行わない限り自然に発現しない。

(g) は (f) にさらに浮遊ベースリンク 6 DOF 分を駆動できるロボットアームを追加したものである。この構成はまさに世界座標におけるヒューマノイド型シリアルリンクモデルの運動学構造であり、四つん這い姿勢や、転倒時の加速度なども再現できる可脳性があるが、人体を持ち上げて駆動するような装置は巨大となり実現しづらい。

各形態の特徴をまとめたものが Tab. 4.1 である。これから開発する操縦インターフェースは、自動車や航空機の操縦システムで議論される操縦性と操舵反力特性を向上させることを評価軸に据えている。ヒューマノイド全身操縦において操縦性は四肢を同時に駆動して目標全身姿勢に素早く到達する能力、操舵反力特性は四肢への力覚の付与である。また、副次的な評価項目として、装着・脱着が容易であるか、コストパフォーマンスは良いか等を考慮し、(f) のような搭乗型全身外骨格コックピットを採用し、力覚を伴う広い上肢の動作と、下肢による広い移動空間の実現を目指す。

4.2.3 装着型外骨格と搭乗型外骨格

人体に沿うように配置されるシリアルリンクロボットは外骨格 (Exoskeleton) 型ロボットと呼ばれ、リハビリ用途 [63] や重作業時のパワーアシスト [64]、遠隔操作の力覚提示用途に使用されている。ただし、外骨格型ロボットの中にも、その運用方法やハードウェア構成によって大きな違いがある。

まず、力覚フィードバックの方式に違いがある。遠隔操縦されるスレーブ側ロボットからフィードバックされるデータとして、関節トルクを利用するか、エンドエフェクタの 6 軸力

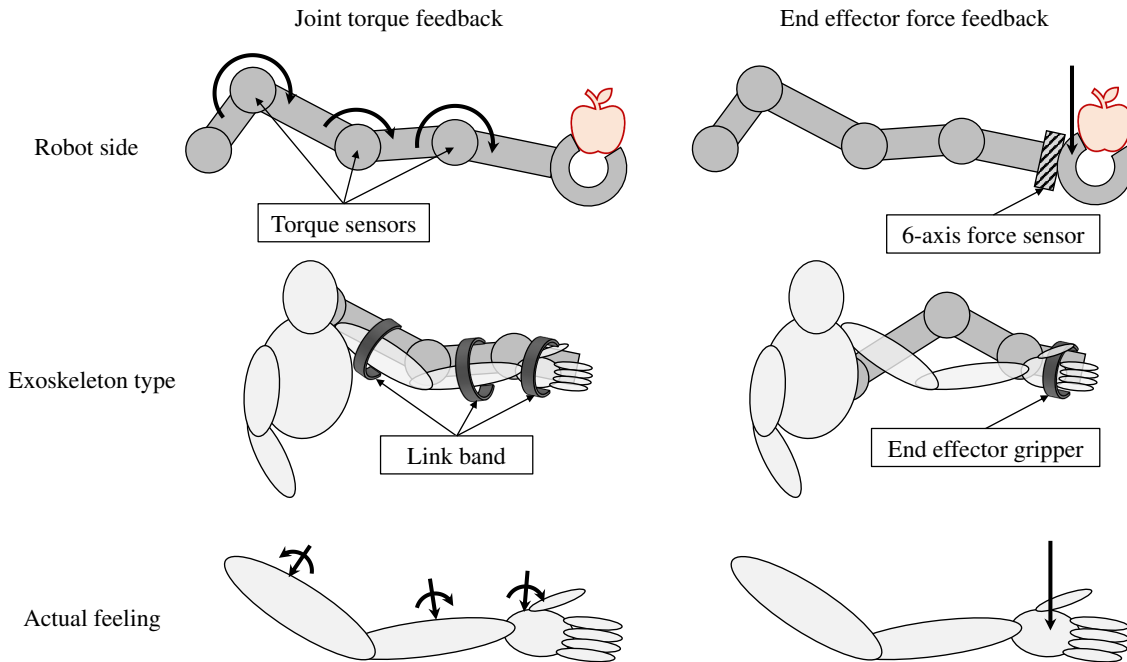


Fig 4.4: Comparison between Joint torque feedback and end effector feedback

を利用するかが選べる。Fig. 4.4 左上段のように、関節にトルクセンサを有するスレーブロボットであれば関節トルクを利用し、Fig. 4.4 右上段のように、エンドエフェクタに6軸力センサを有するスレーブロボットであればエンドエフェクタの6軸力を利用する事が出来る。ここで注意すべきことは、エンドエフェクタに働く6軸力を各関節のトルクセンサで計測しようとしても、シリアルリンクの姿勢によっては正しく計測できない場合があるということである。具体的な例では腕を真っ直ぐ伸ばして壁に手をつくような場合には、壁からの反力は骨格が受ける為、関節にはトルクとして発現しない。その点、エンドエフェクタに搭載した6軸力センサは正しくエンドエフェクタに働く力を計測できる。

マスタ側の外骨格ロボットから操縦者へ力を作用させる場合にも同様な問題が発生する。Fig. 4.4 左中段のように操縦者の各身体部位と外骨格の各リンクをベルト等で拘束して運用する外骨格ロボットが多いが、この運用方法でFig. 4.4 上段のようにスレーブ側エンドエフェクタが受ける外力を操縦者に提示することを試みると、Fig. 4.4 左下段のように、各部位で分散した力を受け取るのみで、操縦者のエンドエフェクタでは正しくスレーブ側の外力を受け取れていない。この状態はマスタ側の操縦者とスレーブ側のロボット間の関節トルクを

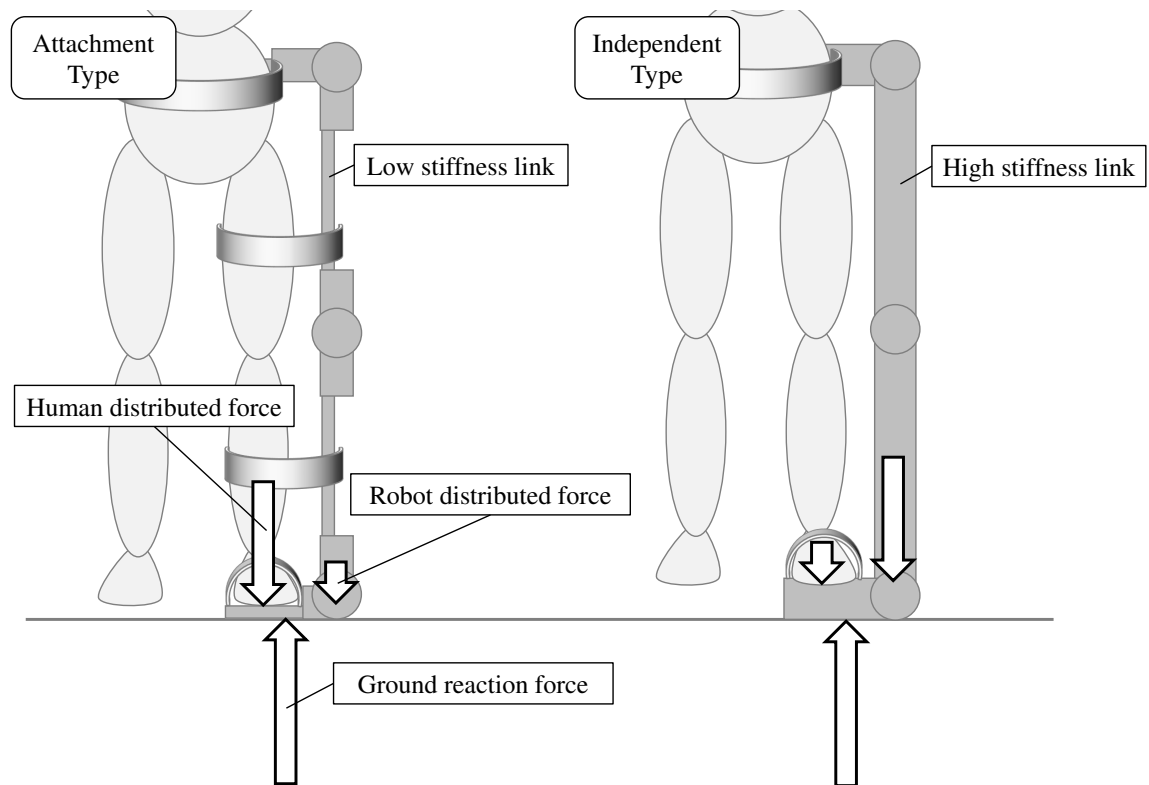


Fig 4.5: Comparison between low stiffness attachment type and High stiffness independent type

同期させていることになるが、操縦者のエンドエフェクタで本来の作用力を受け取ってはいない。

一方で Fig. 4.4 右中段のように外骨格と操縦者のエンドエフェクタ間を固定し、基部を環境などに固定した場合は、スレーブ側ロボットがエンドエフェクタで受ける力を正しく操縦者側に再現出来る。デメリットとしてはエンドエフェクタ以外で受ける力を操縦者側に提示する手段を持たないことであるが、関節トルクフィードバックを行うタイプでも任意のリンクに加わる6軸力を再現できるわけではないので、遠隔操縦用途には Fig. 4.4 右側のエンドエフェクタ6軸力フィードバック方式を採用すべきであろう。

ハードウェア設計にも注意すべき点がある。Fig. 4.5 左のように軽量小型なリンク構造体によって構成される多くのアシスト用外骨格は、それ自身で外部からの6自由度の荷重を負担出来ない。もちろん、コストパフォーマンスや装着者の使用感を鑑みての設計ではあるが、このように剛性の低いリンク構造体では無視できない大きさのたわみが生じるため、荷重を

Tab 4.2: Main specifications of TABLIS

Mass	90 kg
Mass (with base frame)	124 kg
Height (standing posture)	1.9 m
Height (with base frame)	2.1 m
Total DOF	27
Onboard control PC	Intel NUC 8 Core i7-8559U
Control OS	Ubuntu 16.04

適切に支えられる状況が限定される。また、足首に相当する部位が受動回転関節となっているものが多く、外骨格単体で脚運動を全て制御できないため、実際には松葉杖を併用しなければならない。

外骨格装置単体でエンドエフェクタ部の6軸力の再現やアシストを実現するためには、Fig. 4.5 右のように十分な剛性のリンク構造体を持つ必要がある。人間の骨格では耐えられない重作業用パワードスーツや、一部の歩行アシストデバイスではこのような完全独立型となっており、本研究でもエンドエフェクタでの完全な6軸力制御を達成するためにこちらの方式を採用しなければならない。

4.3 搭乗型全身外骨格コックピット TABLIS の概要

本研究では4.2での議論の上、Fig. 4.1 (f) 型の搭乗型全身外骨格コックピットを制作した。機体の呼称 TABLIS は Teleoperation Assist Bilateral Locomotion Interface Skeleton の略語であり、遠隔操縦における脚運動をアシストできるバイラテラル外骨格インターフェースであるという意味を持つ。Fig. 4.6 は TABLIS の全体像であり、Tab. 4.2 は主要諸元である。

以下に TABLIS の特徴を列挙する。

1. 手足エンドエフェクタ4ヶ所と体幹部の座席で人体と拘束される独立型外骨格
2. 低コストで高剛性な板金フレーム構造
3. 平歯車とタイミングベルトの2段減速機構で確保されたバックドライバビリティ
4. 脚部の高負荷関節を駆動する高トルク扁平モータと強制空冷ファン

本節では1について説明する。TABLIS は Fig. 4.4 , Fig. 4.5 で議論したように、高剛性な

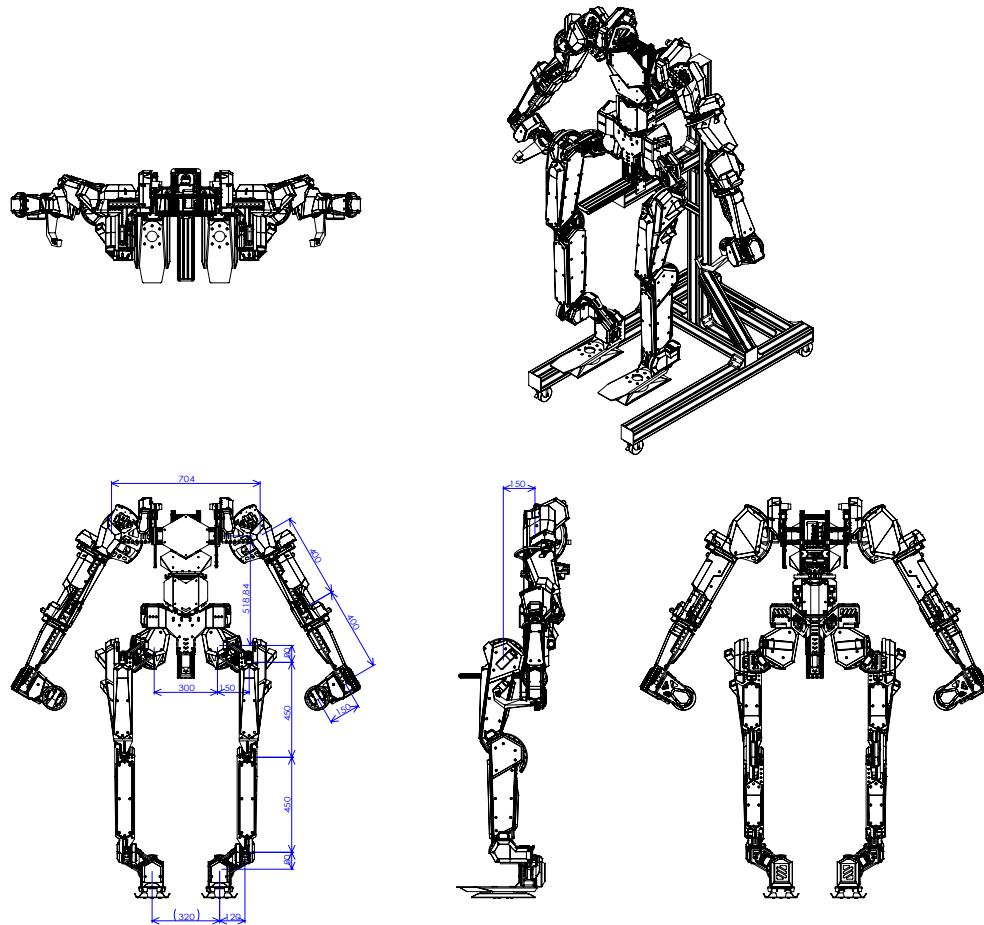


Fig 4.6: Overview of the Seat type whole body exo-skeleton cockpit "TABLIS"

リンク構造によりエンドエフェクタに集中して力フィードバックを発揮する外骨格ロボットである。使用時は、Fig. 4.7のように、自転車のサドルに跨がるような要領で搭乗し、両手はグリップ部を握り、両足はペダル部に固定される。搭乗型コックピットは装着型デバイスに対して、操縦の開始や一時中断が容易という運用面のメリットがある。全身の関節配置はFig. 4.8のようになっている。このデバイスは装着型ではないため、リンク長調整機構などはリンク機構の剛性低下や重量増加を懸念して採用していない。極端に大柄な体格の搭乗者を除いて、外骨格の四肢のリンク長は搭乗者を十分上回るように設計されており、搭乗時には肘や膝に相当する関節が大きく曲がる形で操縦者に合わせるようになる。この仕様はFig. 4.9に手足が伸びきった姿勢のような特異姿勢において、エンドエフェクタで目標のフィードバック力が発揮できなくなる事態を防ぐ効果もある。

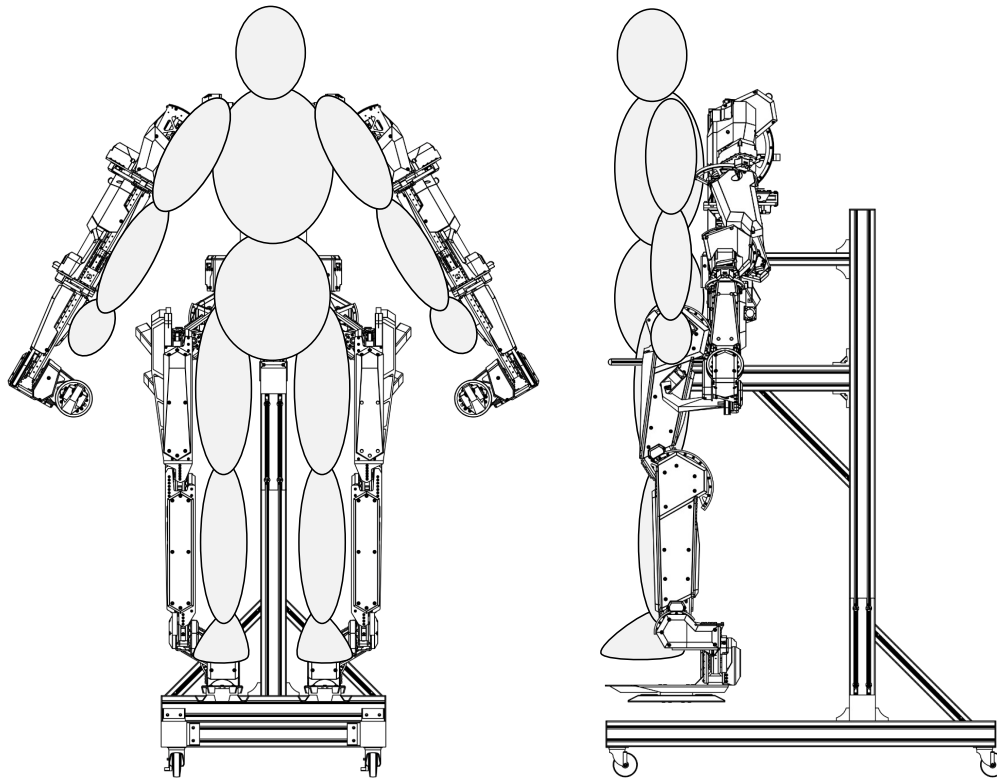


Fig 4.7: Appearance of TABLIS with an operator riding on

また、装着型外骨格デバイスでは人体の関節回転中心や回転軸等に機構が一致するよう配置する必要があるが、独立型外骨格ではその必要がない。一方で操縦者と異なる姿勢で動き回る独立型外骨格のリンクが操縦者に干渉する可能性を極力減らすように、リンクや関節配置を十分検証する必要がある。ただし、脚部は可能な限り操縦者の脚部の関節回転中心と一致させるように設計されている。これは、人間の脚部が立位姿勢を維持するだけでも体重に相当する大きな足先発揮力を必要とすることにより、Fig. 4.10 のように関節中心が操縦者のものからずれた分だけ定常発揮トルクの点で不利になるためである。前述の通り、本デバイスに搭乗する際は、外骨格の膝部が曲がる形で操縦者にフィットするが、仮に全関節がFig. 4.10 右のような初期姿勢のまま操縦者が搭乗した場合、脚部の関節トルクはほぼ0に近い状態で全体重を支えられることになる。

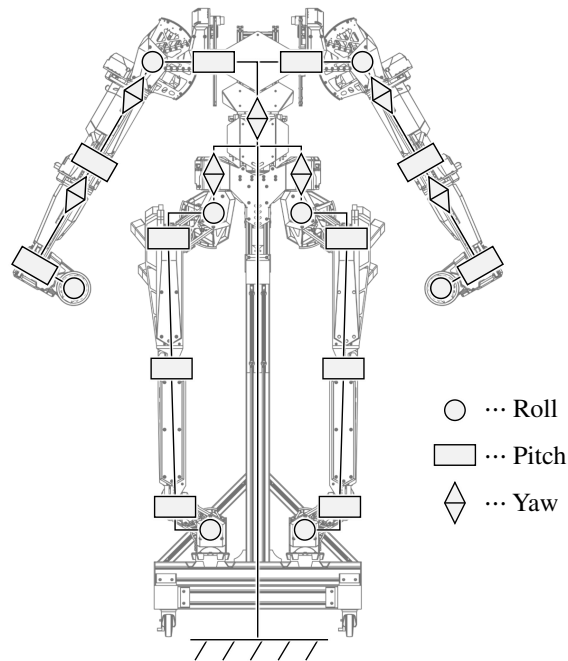


Fig 4.8: 27 DOF joint axis placement of TABLIS

4.4 板金フレーム構造設計の活用によるコストと部品点数の削減

4.4.1 試作ロボットと板金加工の親和性

板金曲げ加工部品は、同規模の切削加工部品や鋳造部品、板金プレス部品に比べて、少量生産時の製造コストが安い傾向にある。もちろん各々の加工法に適した部品仕様で設計・製造するという前提の元、鋳造やプレス加工と比較した場合は鋳型や金型が不要なこと、切削加工と比較した場合は加工時間が短く済むこと、などが加工コストが安くなる要因である。

近年の一般的な板金曲げ部品の製造プロセスは、NCレーザー複合機で材料の金属板からレーザーカットとタッピングを行い、曲げ加工前のブランクと言われる状態の部品を製造する。バリ取りなどを行った後、V型金型プレスなどにより指定の角度の曲げ加工を行い完成する。

特に、NCレーザー複合機によるブランク加工プロセスは、印刷用プリンターのような2次元のレーザーカットであるため、切り出す形状の複雑さが加工コストに与える影響も少ない。貫通穴も円形にレーザーカットすることで短時間で完了し、複合機の機能によりタックも同時に切ることが出来る。電子機器全般に通ずる事ではあるが、ロボットにおいても、

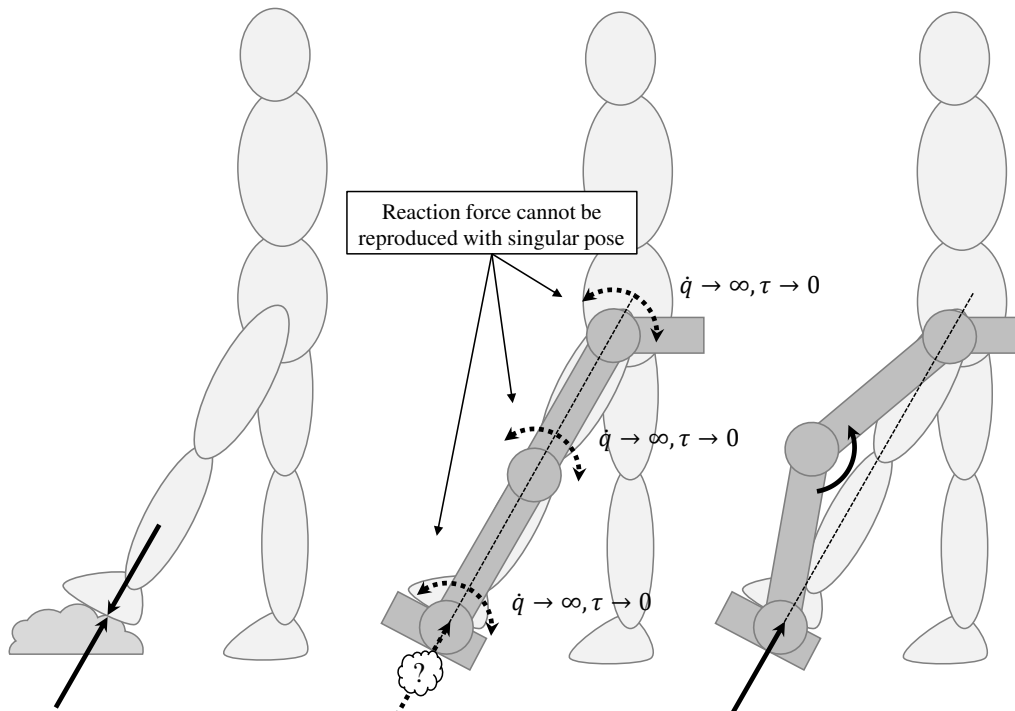


Fig 4.9: When the exo-skeleton being stuck into a singular pose, correct reaction force cannot be reproduced

回路基板取り付け用のネジ穴やカバー取り付け用の穴，ベルト調整用のスロットや肉抜き構造など，リンク構造体の担う役割は多岐にわたるため，それらの機能を低コストで加工できる加工法とは親和性が高い．ただし，一般的なNCレーザー加工の位置精度は $\pm 0.1\text{mm}$ ほどで，軸受けなどの真に精度の要する部分は精密機械加工部品を併用しなければならない．

4.4.2 ロボット用板金設計で使用可能な材質

板金加工部品の設計は，同規模の切削加工部品に比べて多くの加工制約を考慮する必要がある．特に等身大ヒューマノイドロボットのリンク構造体を設計する場合に焦点を絞って紹介する．

まず，使用可能な金属材料に限られる．ロボット用の切削加工部品でよく用いられるステンレス鋼 (e.g. SUS304)，炭素鋼 (e.g. S45C)，超ジュラルミン (e.g. A2017)，超々ジュラルミン (e.g. A7075) といった金属材料は SUS を除いて塑性変形時に硬く割れやすく，曲げ加工には不向きといわれている．SUS も難削材として知られており，タップ加工時のコストが高

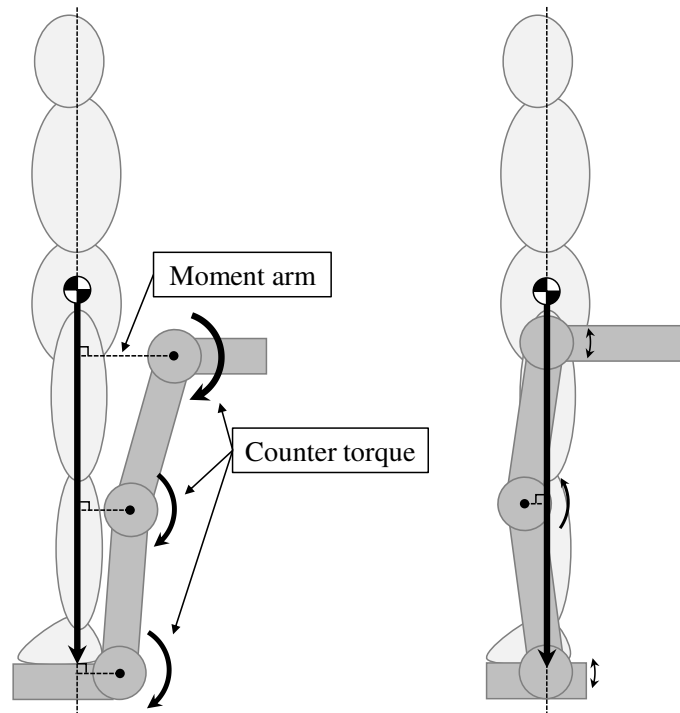


Fig 4.10: The joint aligned kinematic design reduces required torques with the default standing pose

Tab 4.3: Suitable materials for sheet metal robot link design

Material	Cost	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Density (g/cm ³)
SUS304	High	520	197	7.93
SPCC/SPHC	Low	270	206	7.85
A5052-H34	High	260	70.6	2.68

く見積られることが多い。板金加工に適した材料からロボットのリンク構造材に使用できそうなものを選ぶと Tab. 4.3 となる。加工コストを気にしないのであれば、強度や剛性の要る部分には SUS304、軽量化したい部分には A5052 を使用することがよいと考えられるが、加工コストを鑑みた場合、強度や剛性の要る部分には SUS304 の代わりに SPCC を使うことになる。SPCC は本来、自動車のドアなどの強度を必要としない用途に使用する加工しやすい廉価な金属板であるため、A5052 に比べて引張強度の点で優位性は少ない。しかし、剛性に影響を与えるヤング率は鉄系材料であれば一律、アルミ系材料の 3 倍であるため、高荷重のかかる部分に A5052 の代わりに SPCC を使用することは効果的である。Tab. 4.3 以外にも、チタンやマグネシウムなどの板金加工も可能ではあるが、一般的ではないため加工コストが

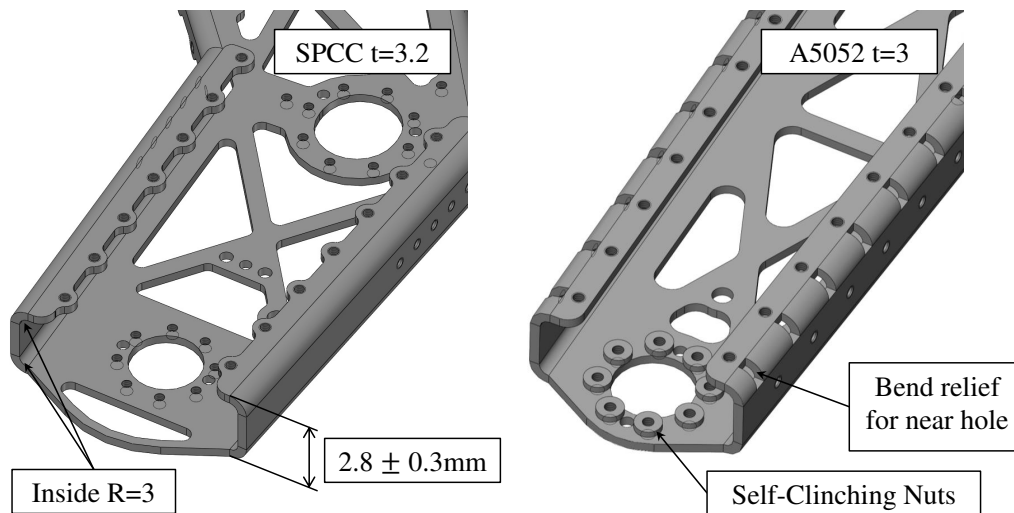


Fig 4.11: An example sheet metal design for robot link frame parts

上がる。

4.4.3 板金フレーム設計における制約

板金フレーム構造において強度を確保しようとした場合、板厚を増やすことを考えるが、十分な精度を保持したまま曲げ加工を施すことの出来る板厚には限界がある。Fig. 4.11 のように箱型構造を作るためのコの字型の形状を考えると、まず、曲げの内Rは板厚と同程度の値が限界で、厚板や割れやすい材質の場合さらに余裕をとる必要がある。また、精密板金加工では基本V字型の金型で直角曲げを行うため、曲げ付近にはV字金型をあてがう分の幅が必要で、その領域に穴加工などを指定できない。どうしても曲げ付近に穴を開ける場合はFig. 4.11 右のように切り欠き状の”逃げ”を設けて、塑性変形の影響で穴形状が崩れることを回避する。レーザーカットの位置精度は $\pm 0.1\text{mm}$ 程度であったが、t3程度の板厚の曲げ加工を行った際の周辺の関係する寸法精度は $\pm 0.3\text{mm}$ 程に低下する。以上の性質などから、等身大ヒューマノイドロボットのような集密度の高い設計を目指すのであれば、現実的に板金曲げ部品として使用できる板厚の上限はt3~t5までが限界という結論を出した。

TABLISでは強度を保ちつつ制作コストを最小にするため、Fig. 4.12のように、脚部の主要な曲げ加工部品はt3.2のSPCCで、ほぼ曲げを必要としない部品はt5のA5052、腕部の主要な曲げ加工部品はt3のA5052で、平板部品はt5のA7075で制作している。ただし、腕部のt3のA5052部品でも、関節締結部のような重要な箇所のネジ穴はFig. 4.11 右のように

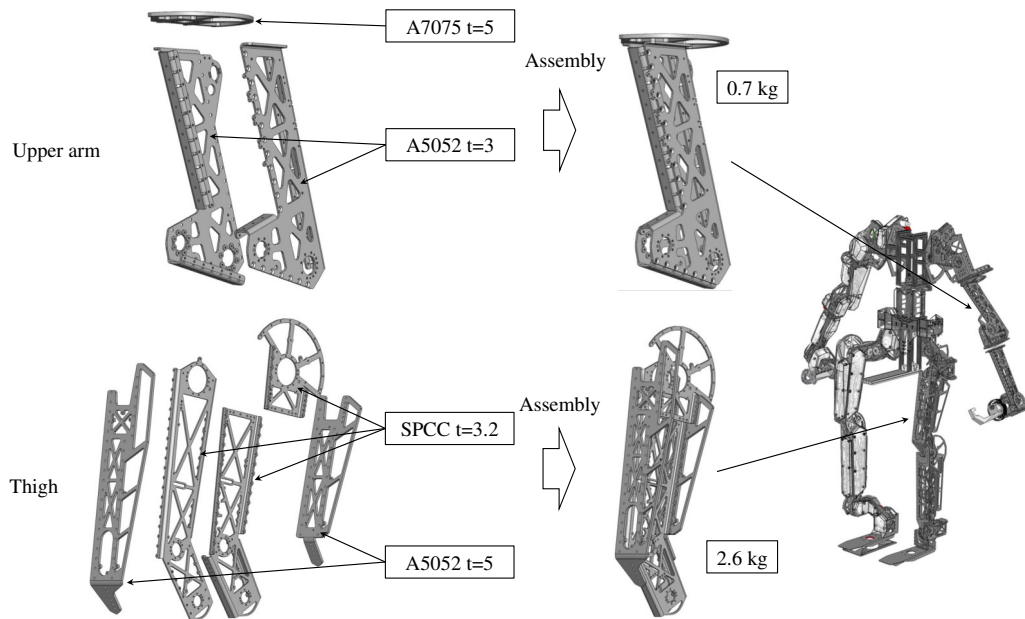


Fig 4.12: Right material and thickness for right place in TABLIS sheet metal frame design

カシメナット (Self-Clinching Nut) を適用することで、ネジ山部だけ高強度な鉄系部材に変更している。

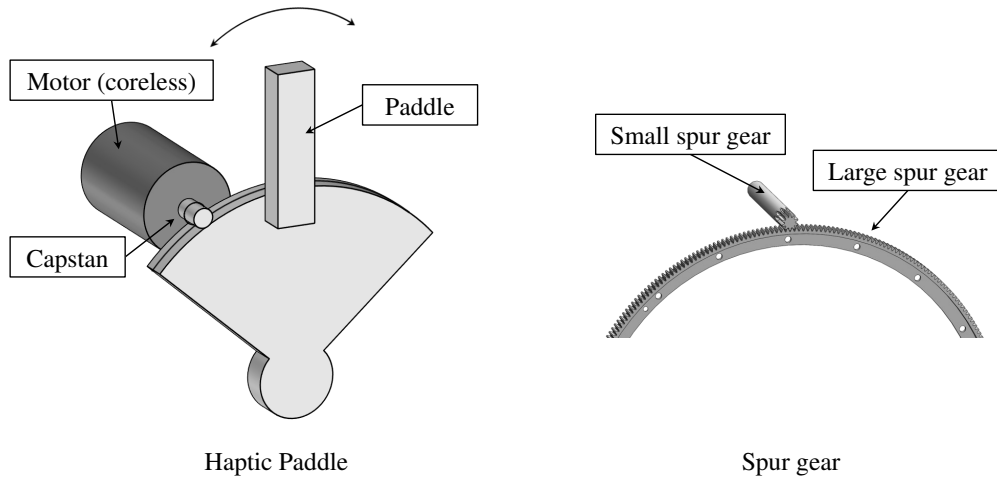


Fig 4.13: An analogy between the two basic mechanism for haptic force feedback device

4.5 全身用ハプティックデバイスとしての減速機構とモータの選定

4.5.1 高バックドライバビリティと高伝動トルクを達成する減速機構の選定

力やトルクを提示できるハプティックデバイスの最も基本的な構造は Fig. 4.13 左のような“Haptic Paddle”と呼ばれるものである [65]。大径・小径の円弧によってモータの回転を減速する点は通常の歯車減速機構と同様であるが、この Haptic Paddle のハプティックデバイスとして重要な点は、

1. 多段減速を使わず、大きな減速比の一段減速機構によって実現した低摩擦損失
2. 伝動のための摩擦力を確保するために大径円弧に張られた糸と、小径リールの巻き取り機構 (Capstan)
3. コギングトルクの少ないコアレスモータを使用することによる滑らかな操作感

などが挙げられる。場合によって Capstan ではなく単にゴム素材などを使った摩擦伝動を採用することもある。このような力フィードバックデバイスは、フィードフォワードなトルク制御系として説明でき、順駆動、逆駆動ともに伝動効率や動特性を良好に確保する必要がある。トルクセンサを内蔵することでフィードバックトルク制御系を構成する例も多いが [66, 67, 68]、機構構築に大きなコストがかかるのでここでは扱わない。ロボット用途では小型で大トルクを得るために高減速比なハーモニックドライブやサイクロ減速機、多段遊星歯

Tab 4.4: Transmission efficiency and output withstanding torque range of several transmission mechanism

Mechanism	Efficiency	Torque range	Backlash/Deflection
Locked wire capstan	High	Very High	fiber wire stretch
Sprocket and chain	High	Very High	chain stretch
Spur gear	High	High	Backlash
Timing belt and pulley	High	Middle	None
Friction wire capstan	High	Low	None
Harmonic drive	Low	High	None

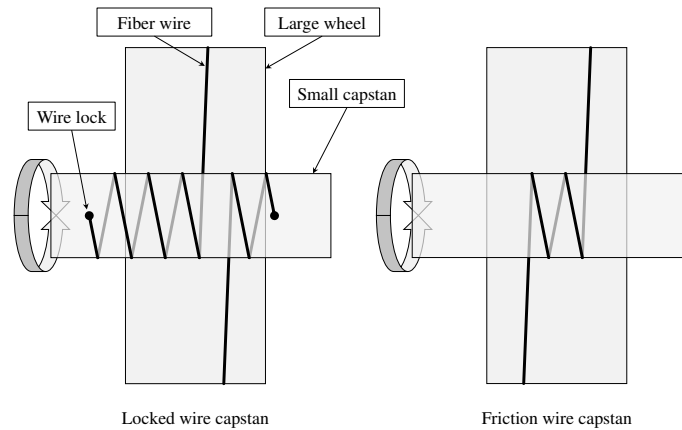


Fig 4.14: Difference between Locked wire capstan and Friction wire capstan

車などが用いられるが、これらは逆駆動時の摩擦損失が大きいことが知られている。各種減速機構の伝動効率と相対的な出力トルクレンジ、バックラッシュの有無について Tab. 4.4 に列挙する。Locked wire capstan と Friction wire capstan の違いは Fig. 4.14 のようにワイヤをねじ止め等によって強固に固定しているか、巻き付けたワイヤの張力によって生まれる摩擦力で保持しているかである。Friction wire capstan は商用のハプティックデバイスによく採用されており [10]、細い金属ワイヤを巻き付けているものが多いが、摩擦によってトルクを伝動するので軽荷重向きである。Locked wire capstan は大荷重を駆動するために採用されることが多く、衝撃荷重や巻き付け半径なども考慮して化学繊維ワイヤを採用することもある [69]。いずれも大荷重時にはワイヤの伸びによるたわみが発生する。

本システムは機構の簡略化と軽量化を鑑みて、数十 Nm 以上の比較的高トルクな関節には平歯車を採用し、低トルク関節にはタイミングベルトとプーリを採用した。平歯車もタイミングプーリも、伝動効率以外は本質的に Haptic Paddle と同じである (Fig. 4.13)。ただし、

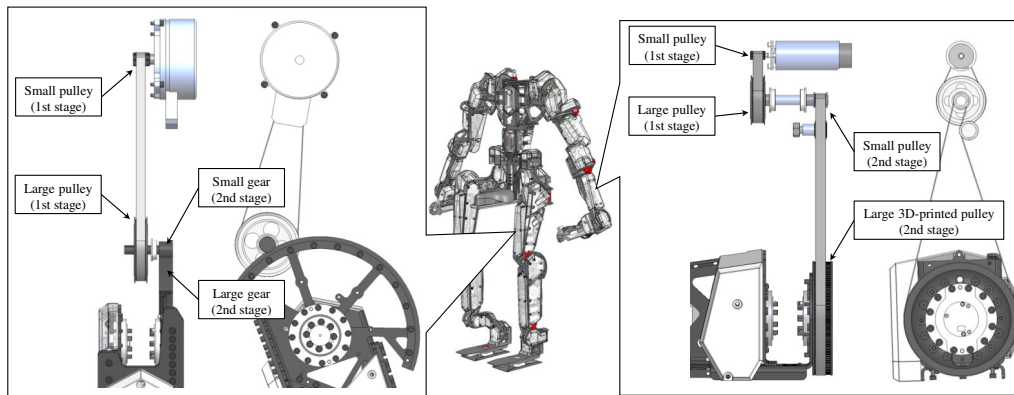


Fig 4.15: 2 types of joint drive system designs are adopted to the high torque - Low backdrivability joint and Low torque - High backdrivability joint

Tab. 4.4 内においてハーモニックドライブ以外は一段減速で十分な減速比を得ることが現実的ではないため、いずれの関節も一段目にはタイミングベルトとプーリを使用した Fig. 4.15 のような二段減速構成とする。タイミングベルトも平歯車も伝動効率は 97%以上と言われているため [70, 71]，二段減速時には 94%以上の伝動効率となる。

4.5.2 高トルクモータの選定

フィードフォワードなトルク制御系としてハプティックデバイスを構成する際には、モータのトルク出力性能とバックドライバビリティも重要な要件となる。まず、ハーモニックドライブのような高減速比な減速機を使わない場合、出力トルク要件は厳しいものとなる。特に、脚部の関節は全体的に腕部よりも出力トルクを要するため、モータ自体が高い出力トルクを発揮できることが望ましい。また同時に永久磁石とコアとの配置におけるコギングトルクや、ベアリングでの機械損、ロータのイナーシャも可能な限り最小化することが望ましい。そのため、モータの選定は高精度な Maxon モータを対象にする。注意すべき点として、近年ドローン用に廉価な大径モータが入手可能になっており、片手サイズで数千 W の出力を謳うものがあるが、それらはコギングや機械摩擦が大きく、出力もドローンのプロペラによって発熱が強制空冷されることを前提に算出されているため、同規模の Maxon モータより高性能であるというわけではない。

選定したモータと競合するモータを Tab. 4.5 に示す。原理的に、トルクの観点ではコアレスよりコアード、円筒型より扁平型が有利である。一方で、ハプティックデバイスのような

Tab 4.5: Adopted motors and competitors

Model	Nominal Torque (mNm)	Rotor Inertia (gcm ²)	Coreless	Mass (g)
○ EC 90 flat 260W 48V	964	5060	Cored	980
○ EC 90 flat 90W 48V	533	3060	Cored	600
EC-i 52 200W 48V	622	264	Cored	1100
○ EC-4pole 30 200W 36V	95.2	33.3	Coreless	300
EC-i 40 70W 36V	129	23	Cored	250

バックドライバビリティを要する用途では、コアレスで円筒型の方が、コギングトルクも少なく、ローターイナーシャの影響も少なくなる。本システムでは、脚部に高トルクな扁平型モータを採用し、腕部には円筒型のコアレスモータを採用する。人間の脚部が高トルクで低感度、腕部が低トルクで高感度であるということを鑑みれば妥当であると考えられる。

次に各関節の減速比と採用モータから算出した定常トルクを Tab. 4.6 に示す。Tab. 4.6 に示した値は、モータが熱的に連続運転可能な最大連続トルクから算出しており、実際の運用時には温度監視が出来ているという前提のもと、2倍以上のトルクで運用することもできる。また、ギア比の計算式中に"+1" されているものは、モータが出力リンク側に取り付けられているがために、ロータの回転と同時にハウジングが出力リンクと共に回転してしまうためであり、注意が必要である。

次に関節を単位角度回転させたときのプーリやモータの換算ローターイナーシャを Tab. 4.7 に示す。実際に関節が回転するときには、各回転機械要素のローターイナーシャはギア比が掛けられた状態で影響する。これらはバックドライバビリティを評価する要素の一つである。脚部の関節は扁平型高トルクモーターを使用しているため、総じて換算ローターイナーシャが非常に大きい傾向にある。

Tab 4.6: Nominal continuous joint torque specs

Joint	gear ratio	Motor continuous torque (Nm)	Continuous torque (Nm)
hip yaw	$72/16 * 90/10 = 40.5$	0.533 (EC 90 flat 90W)	21.6
hip roll	$72/16 * 150/10 + 1 = 68.5$	0.533 (EC 90 flat 90W)	36.5
hip pitch	$72/16 * 150/10 + 1 = 68.5$	0.964 (EC 90 flat 260W)	66.0
knee pitch	$72/16 * 150/10 = 67.5$	0.964 (EC 90 flat 260W)	65.1
ankle pitch	$72/16 * 90/10 = 40.5$	0.533 (EC 90 flat 90W)	21.6
ankle roll	$72/16 * 90/10 + 1 = 41.5$	0.533 (EC 90 flat 90W)	22.1
waist yaw	$72/16 * 150/10 = 67.5$	0.533 (EC 90 flat 90W)	36.0
shoulder pitch	$72/14 * 300/10 = 154$	0.0952 (EC-4pole 30 200W)	14.7
shoulder roll	$72/14 * 300/10 = 154$	0.0952 (EC-4pole 30 200W)	14.7
shoulder yaw	$72/14 * 200/10 = 103$	0.0952 (EC-4pole 30 200W)	9.79
elbow pitch	$72/14 * 200/10 = 103$	0.0952 (EC-4pole 30 200W)	9.79
wrist yaw	$72/14 * 120/10 = 61.7$	0.0952 (EC-4pole 30 200W)	5.88
wrist pitch	$72/14 * 120/14 = 44.1$	0.0952 (EC-4pole 30 200W)	4.20
wrist roll	$72/14 * 120/14 = 44.1$	0.0952 (EC-4pole 30 200W)	4.20

Tab 4.7: Nominal joint rotor inertia specs

Joint	Pulley and shaft (gcm ²)	Motor (gcm ²)	Total (gcm ²)
hip yaw	$549 * 90/10 = 4941$	$3060 * 72/16 * 90/10 = 123930$	128871
hip roll	$549 * 150/10 = 8235$	$3060 * (72/16 * 150/10 + 1) = 209610$	217845
hip pitch	$549 * 150/10 = 8235$	$5060 * (72/16 * 150/10 + 1) = 346610$	354845
knee pitch	$549 * 150/10 = 8235$	$5060 * 72/16 * 150/10 = 341550$	349785
ankle pitch	$549 * 90/10 = 4941$	$3060 * 72/16 * 90/10 = 123930$	128871
ankle roll	$549 * 90/10 = 4941$	$3060 * (72/16 * 90/10 + 1) = 126990$	131931
waist yaw	$549 * 90/10 = 4941$	$3060 * 72/16 * 150/10 = 206550$	211491
shoulder pitch	$143 * 300/10 = 4290$	$33.3 * 72/14 * 300/10 = 5138$	9428
shoulder roll	$143 * 300/10 = 4290$	$33.3 * 72/14 * 300/10 = 5138$	9428
shoulder yaw	$143 * 200/10 = 2860$	$33.3 * 72/14 * 200/10 = 3425$	6285
elbow pitch	$143 * 200/10 = 2860$	$33.3 * 72/14 * 200/10 = 3425$	6285
wrist yaw	$143 * 120/10 = 1716$	$33.3 * 72/14 * 120/10 = 2055$	3771
wrist pitch	$143 * 120/14 = 1226$	$33.3 * 72/14 * 120/14 = 1468$	2694
wrist roll	$143 * 120/14 = 1226$	$33.3 * 72/14 * 120/14 = 1468$	2694



Fig 4.16: Back drivability assessment of the leg part of the exo-skeleton with the attached 6-axis force sensor

4.5.3 下肢外骨格としてのバックドライバビリティの評価

2段減速機構と扁平型高トルクモータで構成される下肢外骨格のバックドライバビリティを評価する。6自由度のシリアルリンク構造の下肢外骨格に対して重力補償制御を有効にした状態で、Fig. 4.16のように外部から手で揺動を加えた際の抵抗力を6軸力センサの値から計測する。その際のエンドエフェクタ6自由度位置のX,Y,Z,Roll,Pitch,Yawの変位と、計測された6軸力がFig. 4.17である。特に抵抗が発生しているのは並進Z方向と、回転Yaw方向である。並進Z方向は足が伸びきるような特異姿勢に近いために、足を縮める方向への変位に100Nもの過大な外力を要しており、並進X,Y方向の $\pm 30\text{N}$ 程の抵抗力に対して顕著に大きい。しかし、人間の下肢も同様に水平X,Y方向には力を発揮しづらく、鉛直Z方向には大きな力を発揮できる。そのため、Fig. 4.16のように人間が手を用いて駆動する際には確かに抵抗力を感じるが、搭乗した状態で搭乗者の足によって駆動する際には気にならなくなる。これは下肢用に関節機構の設計を上肢と差別化したことと、リンク構造を人間の下肢に近い外骨格型にしたことの恩恵を受けているとも解釈できる。ただし、回転Yaw方向に関しては、人間が終末強制回旋という膝下の部位をYaw軸回転できる機能を有していることに対して、TABLISの関節配置は股関節のYaw軸しか有さないため、操縦者が足首のYaw軸動作に対して抵抗を感じてしまう局面もありうる。この欠点は膝下のYaw軸回転に相当する終末強制回旋(Screw-Home Mechanism, SHM)を関節構造に導入[72]することで改善する可能性がある。

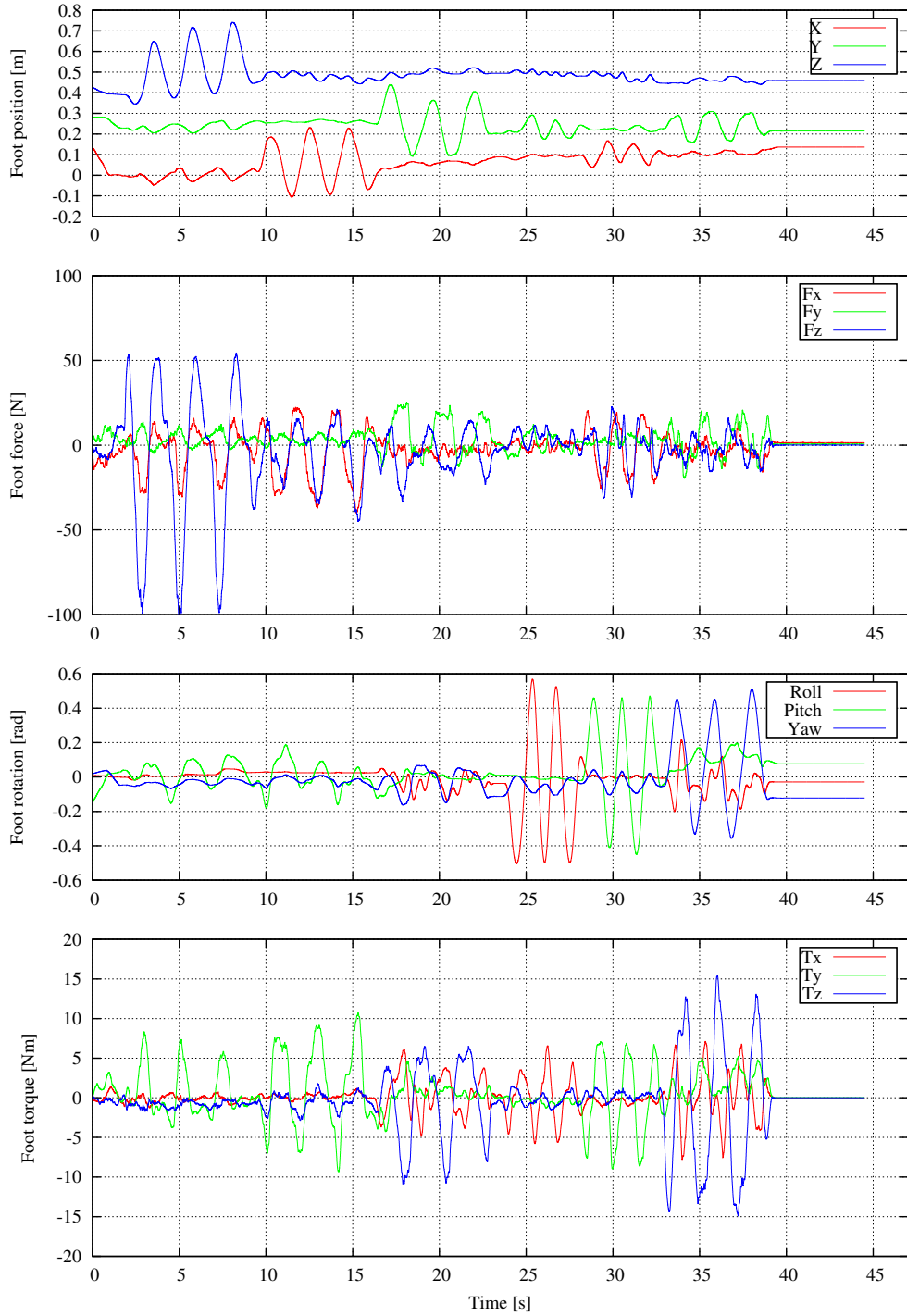


Fig 4.17: Inertial/Frictional reaction force of the back drivability assessment of the leg part of the exo-skeleton

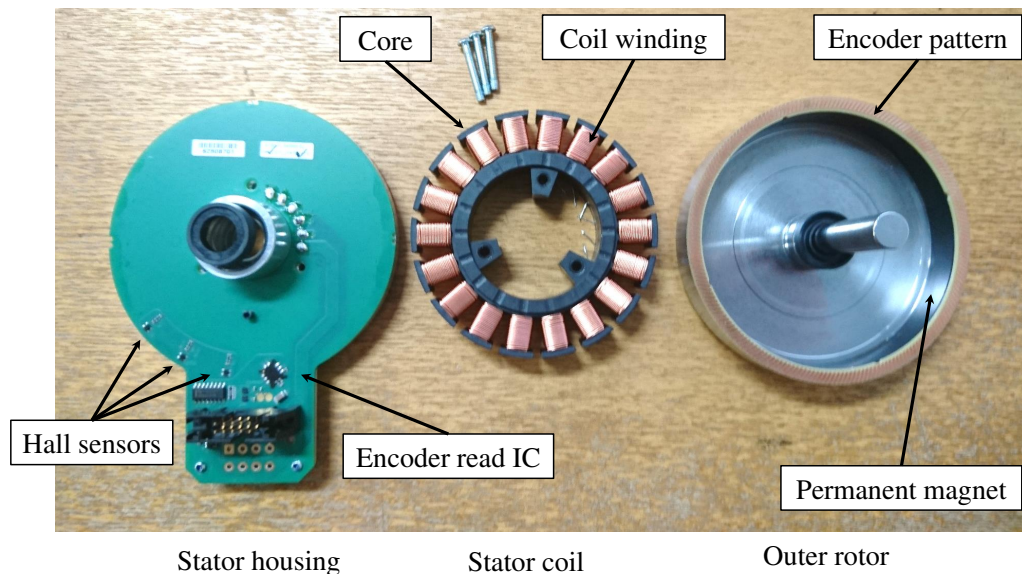


Fig 4.18: Disassembled brushless flat motor components (EC 90 flat 90W)

4.6 モータ巻線温度の計測と強制空冷化による脚用ハプティックデバイスとしての大出力化

4.6.1 モータ巻線温度の計測と強制空冷化

人型全身外骨格の脚部アクチュエータには大きな連続トルクが要求される。また、本システムではフィードフォワードなトルク制御を採用しているため、減速比やモータ規模を大きくすればバックドライバビリティを下げってしまう。ここで、モータに冷却装置を適用することで連続発揮出力を向上する手法は、減速比やモータ質量、ローターイナーシャなどのバックドライバビリティを変化させることなく発揮出力を向上させられる有効な手段といえる。TABLIS では脚部と腰部に採用されている全ての EC flat 90 シリーズモータに対して放熱穴加工を施し、特にトルクを必要とする hip roll, hip pitch, knee pitch 関節に対しては外部ファンによる強制空冷を適用している。

まず、EC flat 90 シリーズモータは Fig. 4.18 のような部位に分解できる。シャフトはベアリングとロックタイト等で接着されているため、プラスチックハンマーでシャフト先端を叩いたり、ベアリングプーラ等で慎重に圧力をかけて分解していく。その際には周辺の IC やエンコーダパターンを傷つけないよう十分気を付ける。

次に、Fig. 4.19 のように固定子側のハウジングを適宜切削し、温度センサを巻き線に挟み

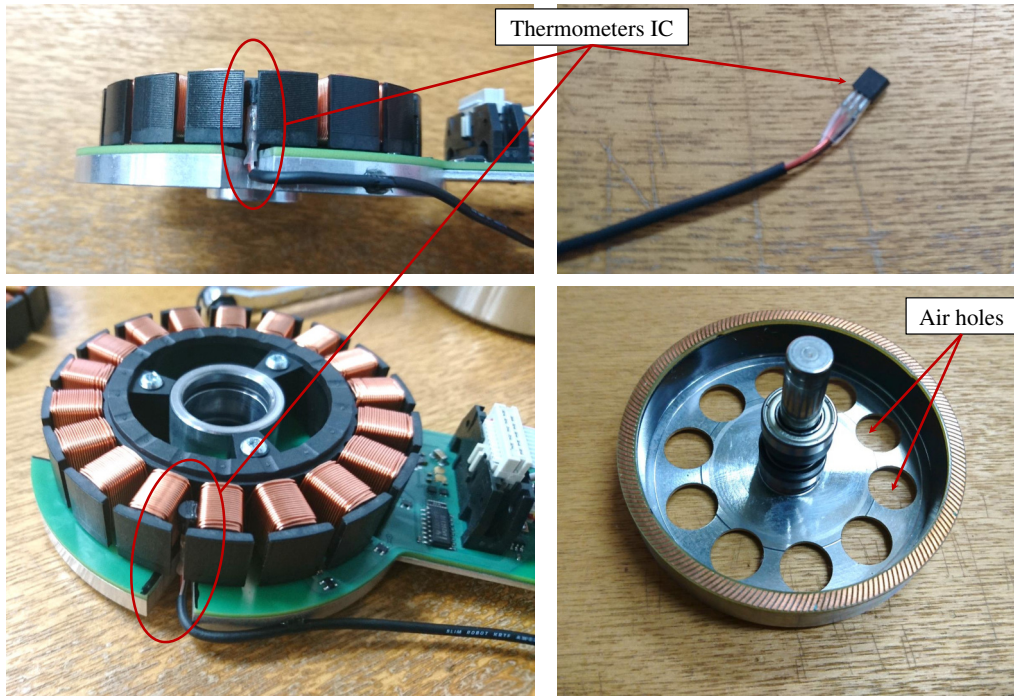


Fig 4.19: Attached thermometer and air hole (EC 90 flat 90W)

込むかたちで取り付け。アウターロータに対しても通気用の穴を追加する。

その後、ロックタイト等を再塗布しながらモータを組み立て、外骨格に組み付ける。Fig. 4.20 は knee pitch 関節に相当するモータの組付け写真である。knee pitch は追加ファンによる強制空冷が適用されているが、放熱用の通気穴が追加された時点ですべての下半身のモータの放熱特性は向上しているものとみなせる。

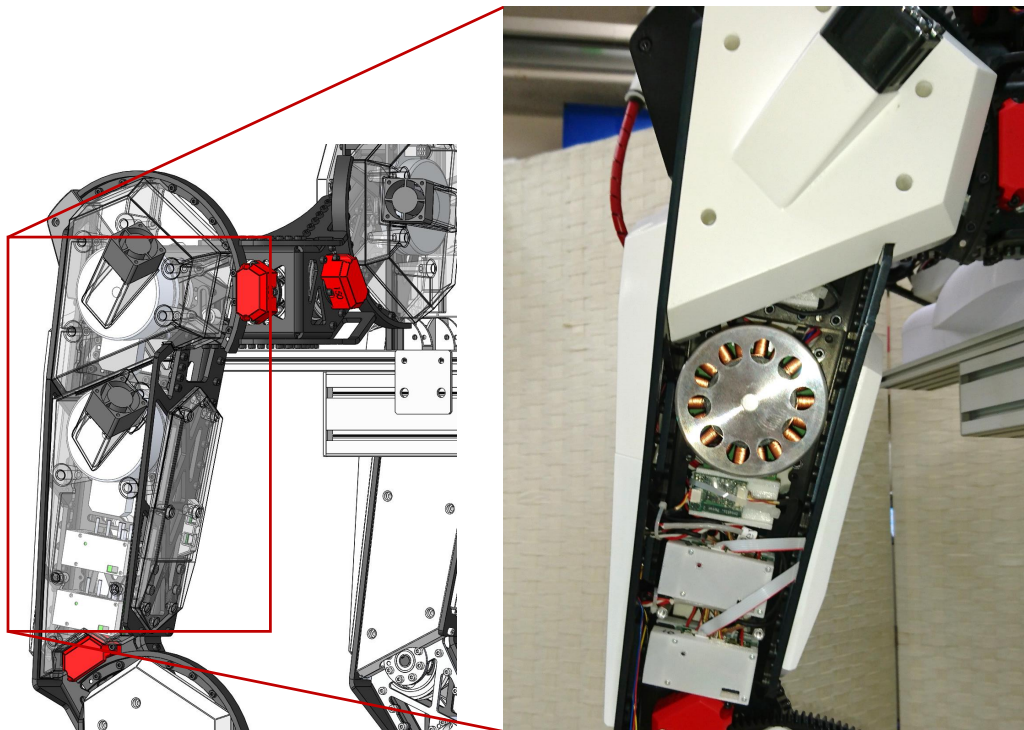


Fig 4.20: Assembled and mounted motor overview (EC 90 flat 260W)

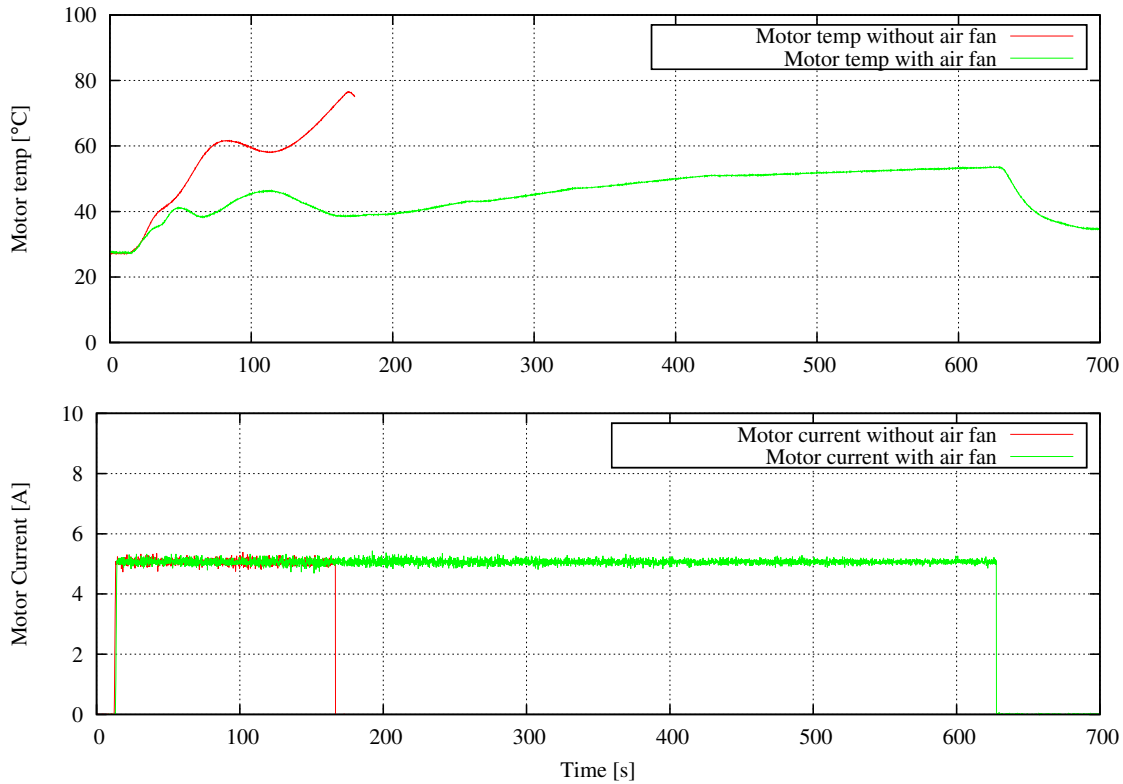


Fig 4.21: Coil winding temperature with and without air cooling method

4.6.2 モータ強制空冷化による放熱性能評価

実際に強制空冷が採用されている関節の発揮トルク-温度性能を検証する。右足の膝の Pitch 軸に相当する MAXON EC 90 flat 260W を対象として、一定の電流を出力させて温度変化を計測したグラフが、Fig. 4.21 である。EC 90 flat 260W 48V 品の最大電流は 4.06A なので、今回計測時に流した 5A は巻線許容温度を超える危険が予想される。EC 90 flat シリーズのエナメル巻線許容温度は 120°C であるが、今計測では 80°C で強制終了するようにしている。Fig. 4.21 中の空冷ファンを使用しない凡例では、5A の電流で 3 分ほど経過した時点で温度が 80°C 付近に達し、強制的に終了した。一方、空冷ファンを使用した凡例では、同じ電流で 10 分程度経過後も 60°C を超えることなく、正常に計測を終了した。この結果からモータの巻線露出と強制空冷が有効であることが示される。

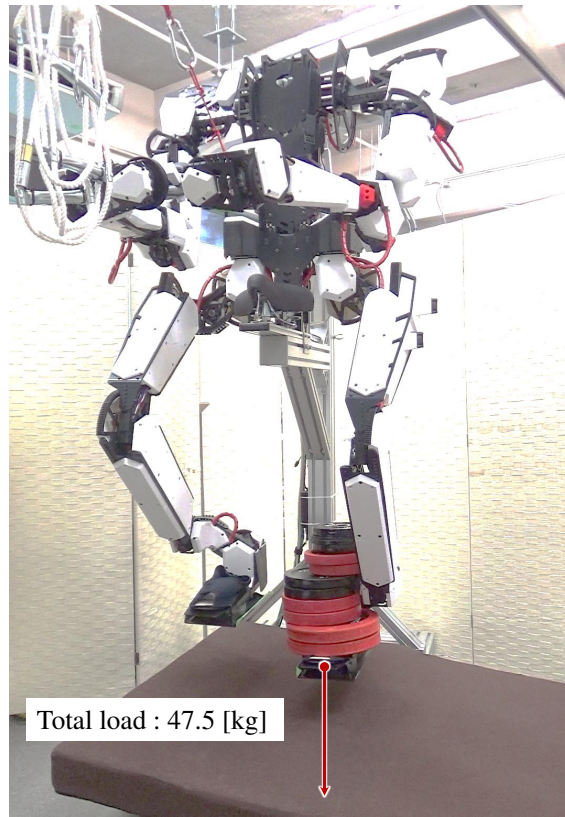


Fig 4.22: TABLIS with 47.5kg load on its left foot end effector

4.6.3 TABLIS の脚エンドエフェクタの最大発揮力評価

Fig. 4.22 は実際に TABLIS の脚部に重りを用いて荷重試験をした様子である。徐々に重りを増やして行き、Fig. 4.23 の 300 s 付近で最終的に合計 47.5 kg の重りを積載した。300 s 以降、定常的に定格の 1.5 倍に相当する 6 A 程度が流れているが、強制空冷の効果によって巻線温度は 60°C 付近で頭打ちになっている。この実験結果はエンドエフェクタ発揮力としてだけではなく、機構的にも 47.5kg の発揮力に耐えうることを示している。

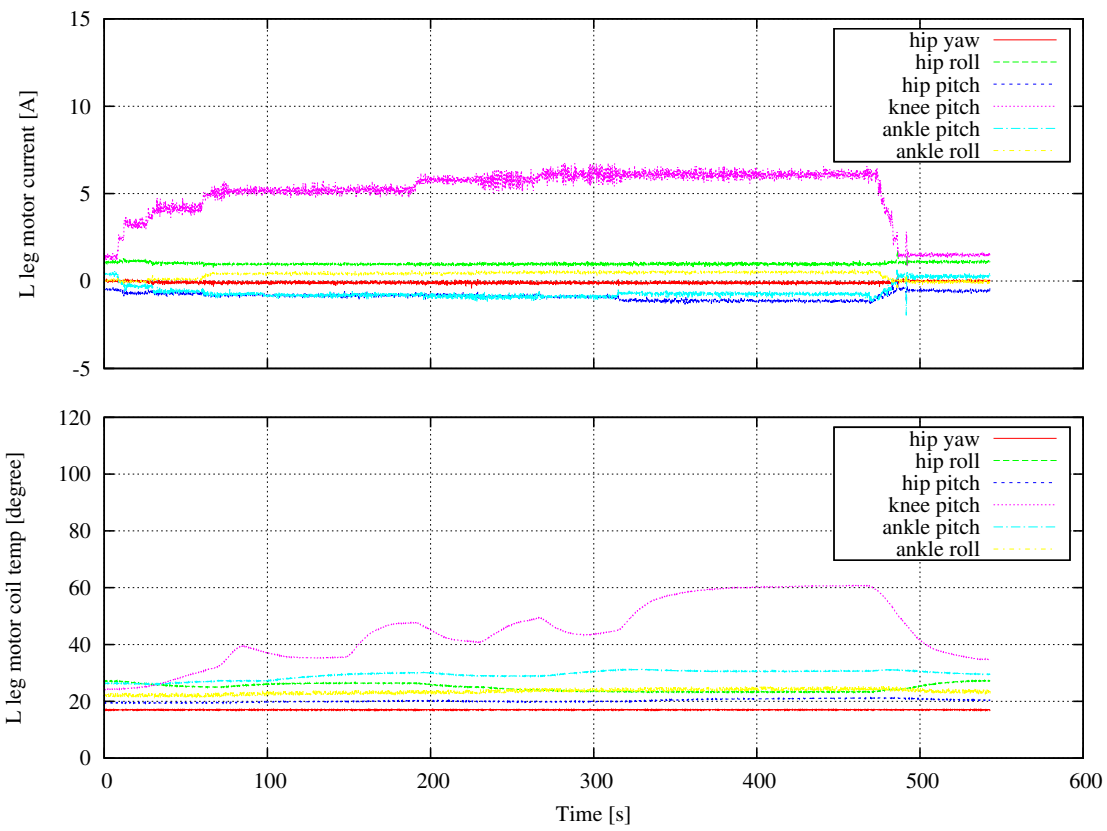


Fig 4.23: Graphs of the motor current and coil temperature of the left leg of TABLIS with 47.5kg load

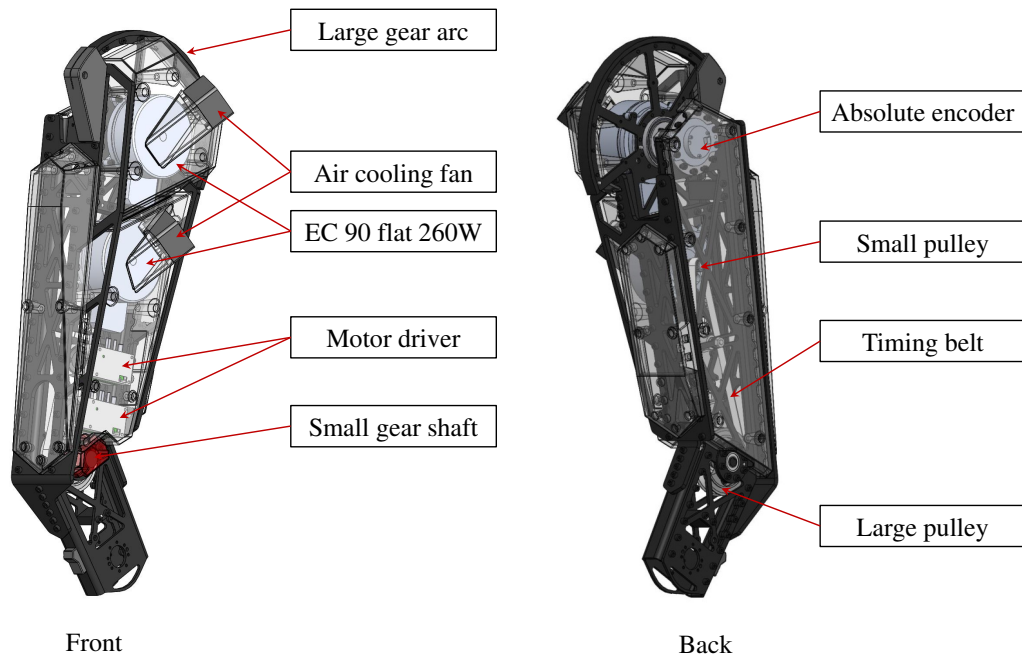


Fig 4.24: All component placement in thigh link of TABLIS

4.7 本章のまとめ

本章ではヒューマノイドロボットの全身遠隔操縦において、全身の良好な操縦性と操舵反力特性を再現できる操縦用インターフェースの構成法を議論し、その設計に関して述べた。本研究で採用した搭乗型全身外骨格コックピットは以下の利点を持つ。

1. 遠隔操縦の中断/再開が容易な搭乗型かつ独立型の外骨格
2. 空冷扁平モータによる大トルクな下肢用外骨格により仮想無限3次元空間上を歩行する際の能動的反力提示が可能

Fig. 4.24 は本章で議論した設計方針によって製作された外骨格の大腿リンクの詳細図である。

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

5.1 はじめに

本章では操縦システムの評価指標である，操縦性，安定性，操舵反力特性のうち，操舵反力特性に関わるヒューマノイド全身操縦に適したバイラテラル制御システムに関して述べる．操縦対象であるヒューマノイドロボットと操縦者の人間との相互入出力に関して，通信遅延や分解能，機構剛性等のあらゆる条件が理想的であるならば，操縦者が対象のロボットを自身の身体のようにそのまま駆動して作業を実行できる可能性もあるだろう．しかし，実際には相互通信できる物理量は限られており，通信遅延やセンサノイズ，アクチュエータからエンドエフェクタまでに含まれる弾性要素やガタ要素などの影響によって，特に力覚を必要とするようなタスク動作の操縦をそのまま実行することは難しい．さらに，ヒューマノイドロボットの身体制御系は多自由度かつ複雑のために制御周期や通信遅延が多く，等身大かつ二足歩行を目指した軽量化のために機構剛性の点でも不利である．

本章ではバイラテラル制御系の構築に不利な点を含むヒューマノイドロボットに対して，直接的なバイラテラル制御関係でなく，日常タスク実行に焦点を当てた操舵反力特性を形成することで，不安定挙動を抑制しつつタスク実現性を向上させる手法について述べる．

5.2 バイラテラル操縦システムの構成

5.2.1 バイラテラル制御システムにおいて議論される減衰要素

モータの出力トルクによって加速度運動する理想的な関節ロボットの力学モデルに対して，実際のロボットのハードウェアでは以下のような多くの減衰要素が存在する．

1. 摩擦要素

一般にロボットに適用される減速機は数百以上の高減速比であり，摩擦損失が大きくなる傾向にある．特にウォームギアやハーモニックドライブ，サイクロ減速機などは順駆動時の伝動効率に対して，逆駆動時の伝動効率が大きく劣り，順方向の伝動効率が50%を下回ると全くバックドライブしないといわれている．このような減速機を使用した場合には外力が関節の変位として全く検出されないことになる．

2. 慣性要素

ロボットのリンク慣性イナーシャに対して，比較的小さい外力や高周波な外力は，関

節の変位として検出しづらい。また、モータや回転伝動部品のローターイナーシャも同様に減衰要素として働く。

3. 弾性要素

剛性の低いリンクや関節機構は外力によって生じるたわみの影響が大きくなる。その状態では、エンドエフェクタに生じる変位が、リンクや関節のたわみとして相殺されてしまい、関節の回転変位として検出されなくなる。ただし、関節の最終段にエンコーダを取り付ける場合や、エンドエフェクタ位置をモーションキャプチャ等で直接計測できる場合にはその限りではない。

4. ヒステリシス要素

歯車のバックラッシュや、軸受けのガタ、あるいは各部の静止摩擦などは、単純な弾性要素ではなくヒステリシス要素として悪影響を与える。

これらは機構によって生じるインピーダンスと解釈され、その場合、マスタ側の機構インピーダンスは入力インピーダンス、スレーブ側の機構インピーダンスは出力インピーダンスと解釈できる。バイラテラル制御では、機構のインピーダンスに加え、制御遅延やネットワーク遅延等も考慮したうえで、マスタ/スレーブの位置/力が相互に入出力される場合のインピーダンス特性を機構透明性 (Transparency)[73] とし、機構透明性を良好に保つことを一つの方針としている。

5.2.2 基本的なバイラテラル制御構造

最も簡単なバイラテラル制御システムの構成は、2つのロボットが互いに相手側の現在位置を位置制御によって追跡する対象型と呼ばれる構成であるが、前述のような機構インピーダンスの影響によって実際には有効に機能しないことが知られている。そこで実際には、対象との相互作用力をより直接的に計測できるように力センサを使用することが多い。基本的なバイラテラル制御システムは、力センサの有無によって Fig. 5.1 のように分類される。

1. 対称型 (Symmetry type)

マスタ側もスレーブ側も互いに相手側との位置の差分を次の指令位置に反映させる。どちらのハードウェアにも力センサを搭載していない場合など。システムにおけるマスタ側とスレーブ側の関係が対称なので対称型。マスタ側とスレーブ側ともに機構イ

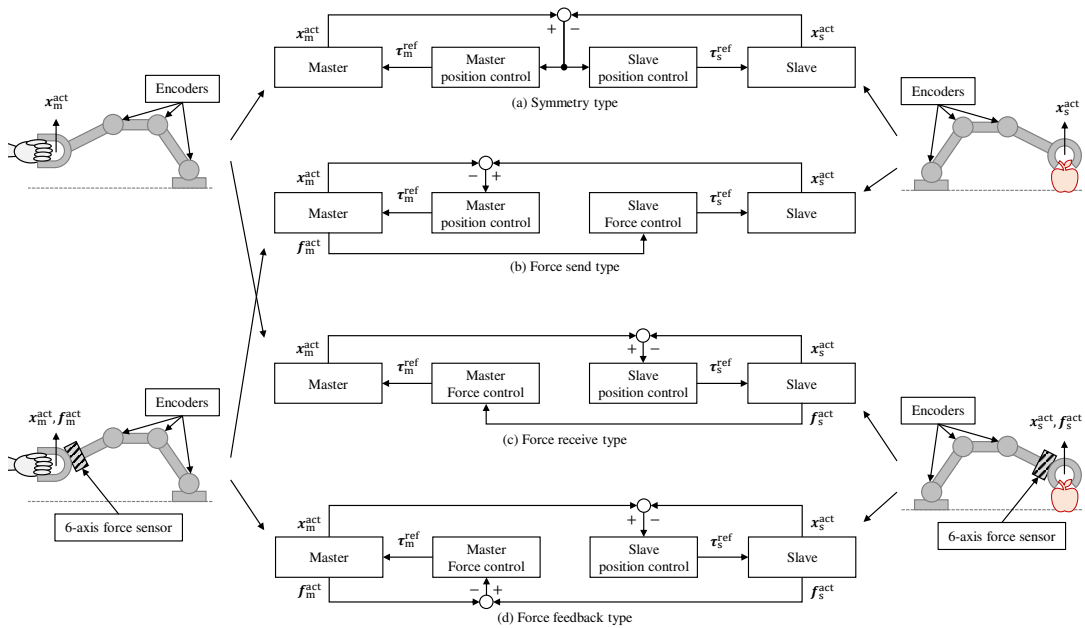


Fig 5.1: 4 basic bilateral connection scheme can be categorized by the master/slave robot use the force information or not

ンピーダンスの影響を受けるため、よほど単純なシステム構成例以外で現実的に使用されることは少ない。

2. 力順送型 (Force transmit type)

スレーブ側は、マスタ側のグリップ部などに取り付けられた力センサで計測した操作力を指令値として力制御される。マスタ側は、スレーブ側の現在姿勢に追従するように位置制御される。マスタ側の機構に操作力が入力される際の入力インピーダンスの影響は少なくなるが、スレーブ側のエンドエフェクタには力センサが存在しないため、対象物体からの接触力がスレーブ側の機構インピーダンスによって減衰する。

3. 力逆送型 (Force receive type)

マスタ側は、スレーブ側に取り付けられた力センサで計測した接触力を指令値として力制御される。スレーブ側は、マスタ側の現在姿勢に追従するように位置制御される。スレーブ側の機構に対象との接触力が入力される際の入力インピーダンスの影響は少なくなるが、マスタ側のエンドエフェクタに操作力が入力される際の機構インピーダンスの影響は存在する。

4. 力帰還型 (Force feedback type)

マスタ側とスレーブ側両方に力センサが搭載されている。マスタ側は力逆送型と同様に、スレーブ側に取り付けられた力センサで計測した接触力を指令値として力制御されるが、その際にマスタ側のエンドエフェクタの力センサの情報も利用したフィードバック制御によって力を再現するため、マスタ側とスレーブ側の両側の機構インピーダンスの影響を低減できることが期待される。

6軸力センサによるエンドエフェクタの力計測は各関節のトルクセンサでも代用可能だが、特異姿勢付近では6自由度のうちの一部の自由度が計測できなくなるデメリットはある。また、外乱オブザーバなどによって力センサやトルクセンサ無しに外力を推定する手法もあるが、機構インピーダンスの影響が大きい場合には十分な精度が得られない。

5.2.3 TABLIS のバイラテラル制御システムにおける分類

TABLIS をバイラテラル制御システムのマスタデバイスとして運用する場合、マスタ側である TABLIS は力センサを搭載していないため、スレーブ側はエンドエフェクタ付近に6軸力センサを搭載したヒューマノイドロボットを利用することになる。そのため TABLIS の遠隔操縦時のバイラテラル制御システム構成は力逆送型に分類される。TABLIS は減速機構の摩擦損失を極力減らし、力センサ無しに十分なバックドライバビリティをハードウェアレベルで確保しているため、力逆送型におけるマスタ側の機構インピーダンスによるデメリットを低く考慮することが出来る。ただし、より良好な操舵反力やバックドライバビリティを必要とするならば、力センサの追加によって力帰還型のバイラテラル制御システムに拡張可能である。

5.3 複雑なロボットシステムと通信遅延に対する対策

5.3.1 TABLIS におけるバイラテラル制御ソフトウェアシステム構成

Fig. 5.2 には TABLIS を用いて対象のヒューマノイドロボットを操縦する際の、ネットワークや実行プログラムの構成を示している。マスタ側となる TABLIS と、スレーブ側となるヒューマノイドロボットは、各々独立したヒューマノイドロボットシステムとして運用できるように構成されている。どちらのロボットも、上位層の ROS, 中位層の OpenRTM, 下位

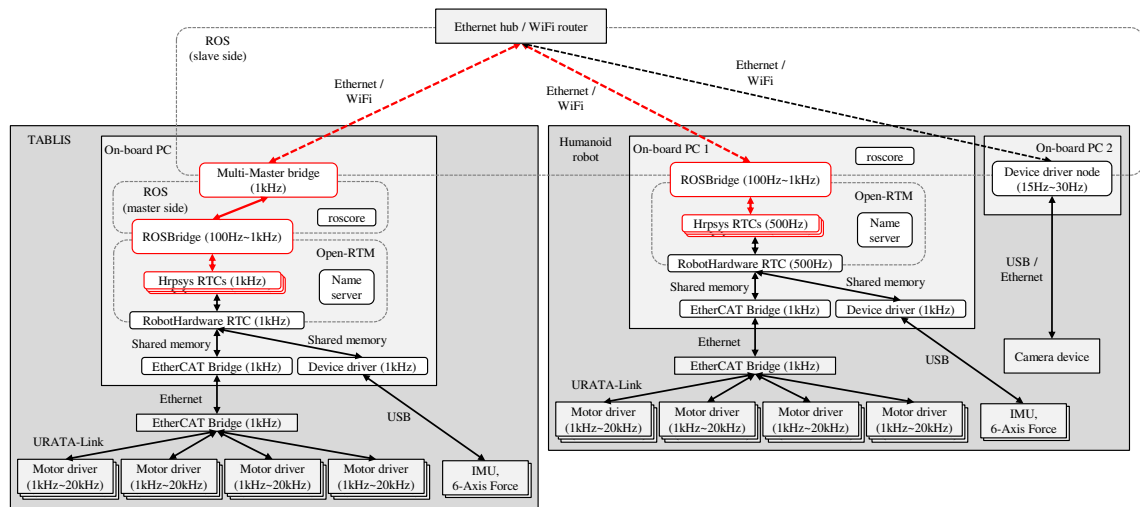


Fig 5.2: Hardware and network connection of the whole body bilateral system with 2 humanoid robot system

層のハードウェアデバイスドライバーと、階層的な制御システムが構築されており、リアルタイム性の強い制御要件と、ユーザーによるインタラクティブな運用性を両立している。ここで注意すべきことは、下位層から上位層に移るほど操作性や運用性が向上する一方で、リアルタイム性を徐々に損なうということであり、特に相互にフィードバック関係にあるバイラテラルシステムでは致命的である。本システムの2体のロボット間においても、上位層のROSではなく、よりリアルタイム性の高い中位層のOpen-RTMで相互接続させることも可能であるが、より柔軟な運用性を持つROSによる相互接続を採用している。これは、実社会における運用時には、多種多様なデバイスや操縦対象を、低品質なネットワーク越しに接続する状況が十分想定され、どちらにせよリアルタイム性の低下は避けられないという考えでもある。次項では実際にネットワーク越しに相互接続された2つのロボットシステム間の通信遅延について評価する。

5.3.2 実際のネットワークシステム構成時の遅延評価

一般に十分な力覚を再現するバイラテラル制御を達成するためには1kHzの制御周期が必要とされている。これは暗に通信遅延なども含めて1ループが1ms前後のオーダーであると解釈すべきである。この条件は複雑度の低いデバイスを近距離の有線ネットワークによっ

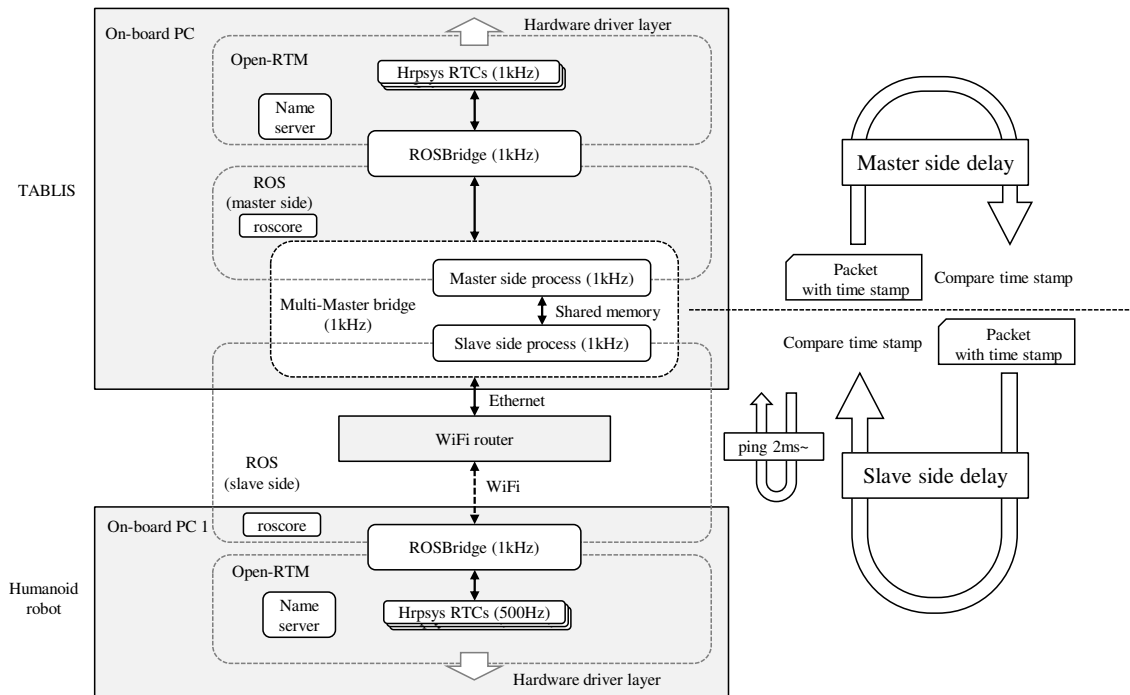


Fig 5.3: A situation of the bilateral network delay evaluation with time stamp packet

て接続する場合には十分達成可能な条件である。しかし、前述の通り複雑なソフトウェアシステムを持ち、無線ネットワーク等を経由することも想定される遠隔ヒューマノイドロボット操縦においては、1ms 前後の通信・制御周期を達成することは難しいであろう。

実際のバイラテラル制御システムのネットワーク構成において遅延を計測評価する。計測する区間は Fig. 5.2 中の赤色部の上位，中位層までとする。Fig. 5.2 中の赤色部の詳細が Fig. 5.3 である。2つのロボットシステムは互いの上位層である ROS によって接続されるが、マスタ側もスレーブ側も各々の ROS 中枢である roscore を持った独立システムであり、ROS ノードは基本的に一つの roscore しか参照できないため、2つの ROS ノードプロセス間を共有メモリによって接続する。この接続プログラム自体も 1kHz 程度で動作するため、最大 1ms の遅延を考慮しなければならない。遅延を計測する区間は Fig. 5.3 右側の様にマスタ側とスレーブ側に分かれており、通信遅延が生じた際の原因の切り分けや特定がしやすいようにしてある。2つの ROS ネットワークの境界に位置する ROS ノードから各ロボットシステムに、その時刻のタイムスタンプを有するパケットを送信し、Open-RTM 内の制御 RTC まで到達しだい、パケットを送り返し、再び送信プロセスに帰ってきた時点での時刻と比較す

ることで遅延時間を見積もる。Fig. 5.4 はバイラテラル制御システムが実行されている時の、マスタ側とスレーブ側の時間遅れと、マスタ側から計測したマスタ-スレーブ間の通信量である。通信遅れはマスタ側が平均 3ms でスレーブ側が平均 4ms と読み取れる。このネットワークのハードウェア構成は Fig. 5.3 のように無線 Wi-Fi 接続を一ヶ所含み、マスタ側 PC からスレーブ側 PC への ping 応答値は通常時 2ms 程度である。ping 2ms に対して、スレーブ側の内部処理含めてもスレーブ側通信遅延が 3ms というのは早すぎるように感じられるが、時間計測用パケットは Hrpsys 内の特定の RTC に到達後すぐに返信されるため、hrpsys の RTC 群が 500Hz で動作しているからといって必ず 2ms 遅延するというわけではない。そのため、タイミングが揃えば、N ループ目の ROSBridge で受信 →hrpsys のある RTC で受信後すぐ返信 →N+1 ループ目の ROSBridge で返信、というようにスレーブ側の体内 PC では最短で 1ms しか遅延しないような計測結果となることは十分考えられる。もちろん、制御システムによっては、最初の RTC で必要データを受信後、後続の RTC で順次処理し、最後の RTC で返信する、といった構成になることも考えられるので、今回の計測結果には+1~2ms 程度加算して見積もるべきである。

マスタ側の計測に関してはネットワーク経路を介さないため、純粋に体内 PC 内の処理遅延である。ping 応答値 2ms の区間を経由するスレーブ側に対して、マスタ側は 2ms 分応答が早くなることが期待されるが、実際には 1ms 程度しか差が開いていない。この結果をもたらした原因としては、

1. マスタ側は制御周期が 1kHz と高く、定常的に IO や CPU 負荷が高く、体内遅延が大きい
2. 本システムでは ROS 通信に UDP モードを選択しており、実際には通信遅延は 1ms しかない

が考えられるが、これ以上の正確な計測は難しい。また、Wi-Fi においてより致命的な問題は、負荷時や電波障害時におけるジッタの急激な増加である。

Fig. 5.5 では、意図的にネットワークに負荷をかけた際の遅延を表している。Linux の iperf コマンドを使用してマスタ側からスレーブ側への大量のデータ送信負荷をかけると、負荷がかかっている時のみスレーブ側の通信遅延が増加していることが分かる。

また、さらに深刻な問題として、電波干渉に起因する大幅な遅延がある。Fig. 5.6 では、長時間遅延を状況を観測時に不規則に現れる遅延現象であり、120ms にも及ぶ致命的な遅延

が起きている。これらは、他のWi-Fi機器や気象レーダー等との電波干渉や、接続機器の増加によって発生するスイッチングなどに起因しており、Wi-Fiの仕様上避けられない現象である。

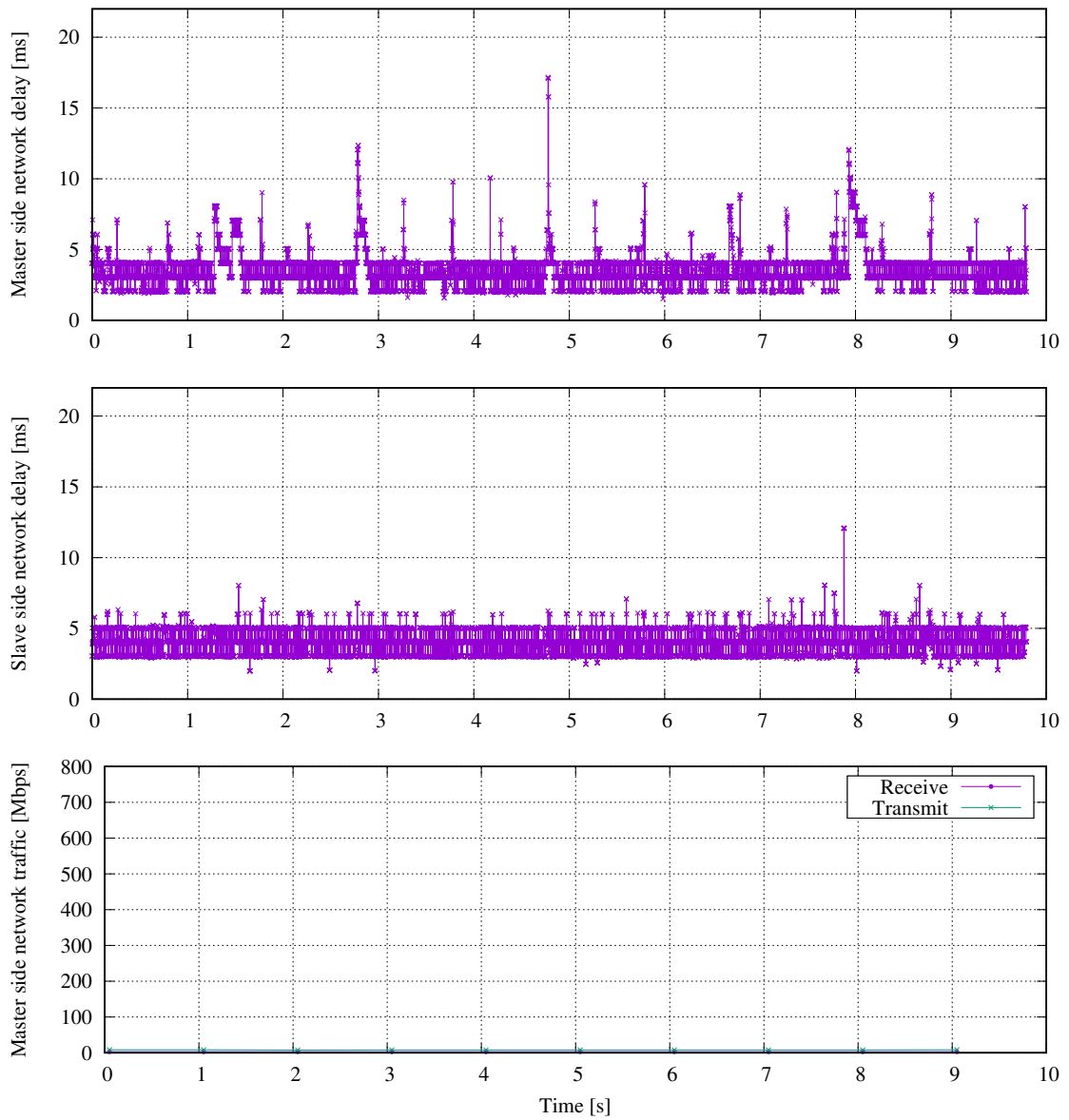


Fig 5.4: Network delay graph of the normal operation

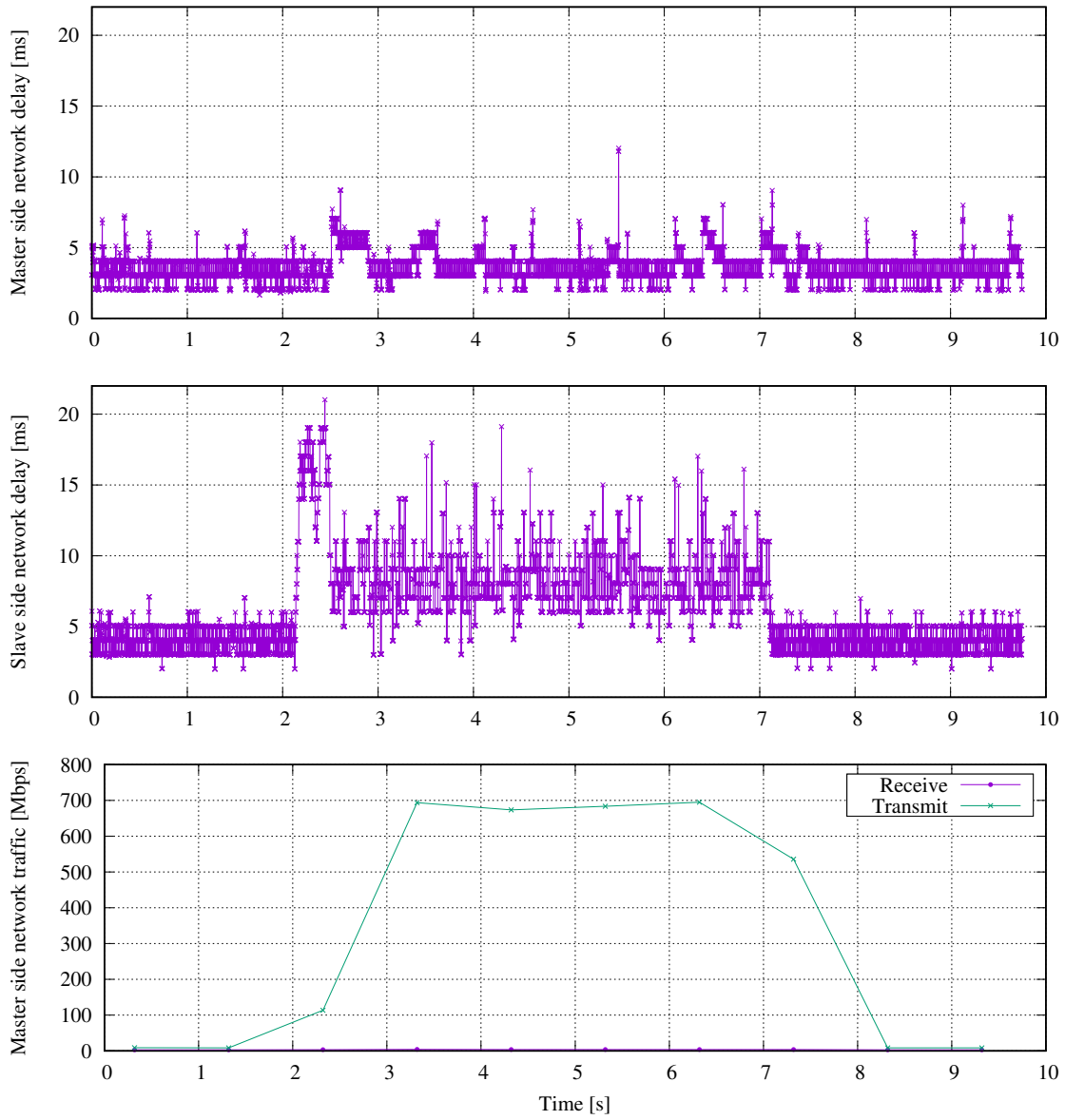


Fig 5.5: Network delay graph when an intentional network load occurs

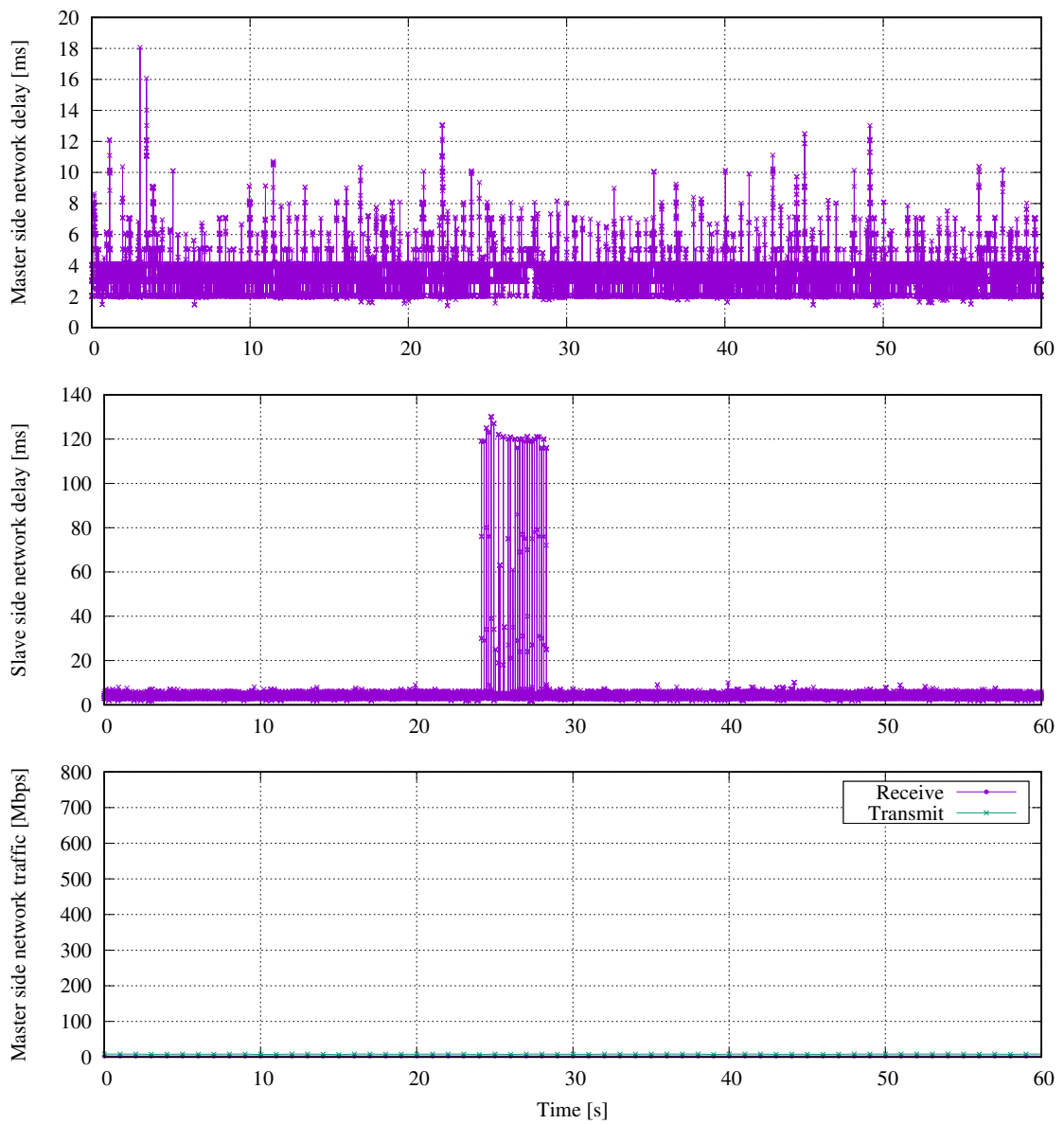


Fig 5.6: Network delay graph when a wifi interference occurs

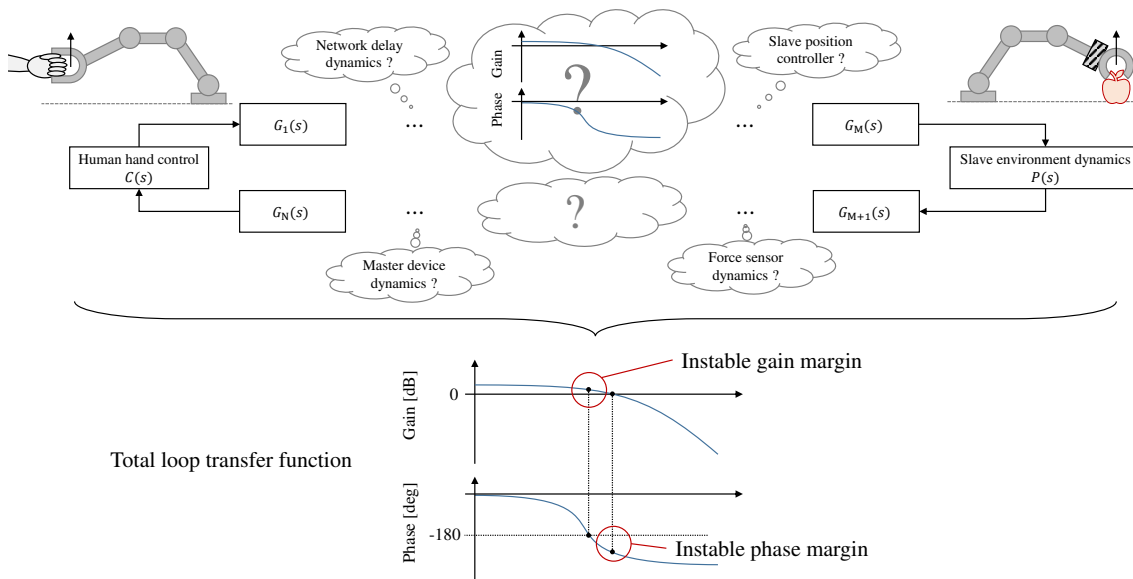


Fig 5.7: Various phase lag element in a bilateral system cause serious instability

5.4 不安定振動を抑制しつつ接触力を伝える周波数整形

バイラテラル制御において、物体との接触時の振動は避けがたい問題である。その原因はバイラテラル制御システムの各所に存在する位相遅れ要素である。十分なハプティクス再現には 1kHz の制御周期が必要であるという目安があるように、十分に高速な制御周期と低位相遅れが達成されれば、バイラテラル制御系の振動的挙動は無視できるが、実際のヒューマノイドロボットのマスタ・スレーブシステムにおいて、ネットワーク通信、制御演算、アクチュエータ基板との通信などを全て含めた 1 ループの通信周期が 1ms に収まることは難しい。また位相遅れに関しても、マスタ側やスレーブ側のデバイスの機構の弾性はバネ-マス-ダンパ系のような位相遅れ要素として振る舞い、ネットワークの遅延はむだ時間要素として存在し、それら全てを合成すると無視できない大きさの位相遅れが存在してしまう。Fig. 5.7 はバイラテラル制御系に存在する多数の小さな位相遅れ要素が、最終的に大きな位相遅れとなって不安定な振動的挙動を示す状況を説明している。このバイラテラル制御システムの位相遅れ問題においては、制御問題として以下の扱いづらい特徴がある。

1. 微小な位相遅れ要素が各所に点在し、モデル化が困難
2. 通信遅れは位相遅れ要素ではなく、むだ時間要素

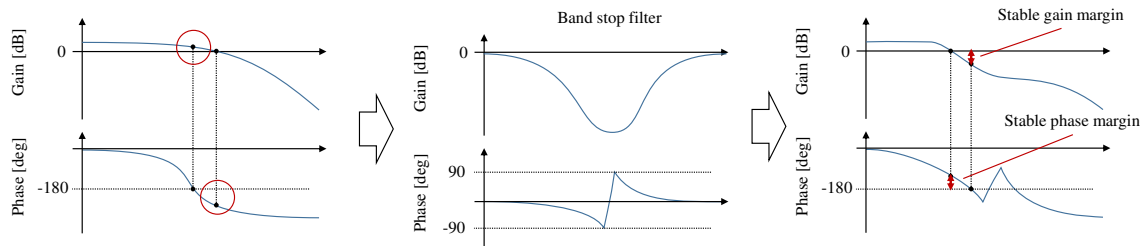


Fig 5.8: Bandstop filter for vibration control

3. 人間の操縦者の腕部がパラメータ不明のコントローラとして介在

このような悪条件のフィードバックシステムの振動的挙動を抑える為に基本的に行うことの出来る戦略は、フィードバックゲインを下げることである。バイラテラル制御系全体の具体的なモデル化はできないものの、不特定多数の位相遅れ要素によって不安定挙動を示していることは間違いない。つまり、Fig. 5.7 中下部のボード線図のように、実際の系全体の一巡伝達関数のゲイン余裕や位相余裕が不足している状況であると解釈でき、何らかの手法によってゲイン余裕や位相余裕を改善してやれば良い。ただし、操縦者の腕による操縦をPIDコントローラのように捉えた場合、そのPIDゲインは本人に意図的に調整して貰わない限り干渉はできない為、そこにコントローラ設計という手法は適用できないと考えたほうがよい。また、位相進み補償要素も位相遅れを改善する一方で高周波域のゲインを増大させるため、確実に安定化出来る保証はなく、数値微分を伴うため経験上扱いが難しい。その点、ゲインを下げることは適用が容易であり、確実にゲイン余裕を確保できる。一言でゲインといっても、指令移動量のゲインや力フィードバック量のゲインなど、調整可能なゲインは複数あるが、力逆送型バイラテラル制御系においてはスレーブ側からの力フィードバック量のゲインを調整することが適切であろう。その際は、マスタ側からスレーブ側へ送信する手先位置指令は等倍で実行されることに対して、スレーブ側からマスタ側にフィードバックする提示反力は低下してゆく。一般的に、バイラテラル制御系において硬い物体に接触すると不安定になりやすいという傾向は、硬い物体との接触時はスレーブ側のエンドエフェクタ位置の変化量に対して返ってくる反力が大きいためであり、つまりは入力位置に対する出力反力のゲインが大きい状態にあるからであり、スポンジなどの弾性係数の低い物体を挟むことで振動が抑制できるというのも、ある種のゲイン調整を適用していると解釈できる。

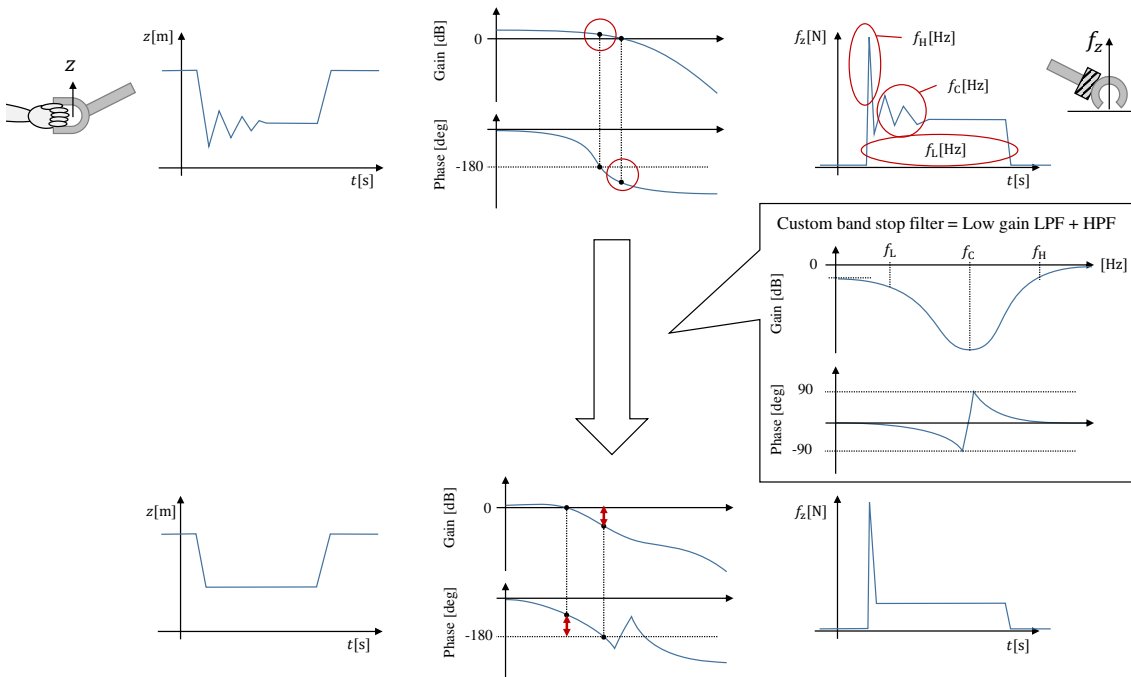


Fig 5.9: Custom bandstop filter: user can design each of high, middle, low frequency gain to suppress undesired vibration and reproduce realistic touch sense

しかし、単純に全周波数域において等しくゲインを下げてしまうと、マスタ側での操作感を大きく下げ、スレーブ側でも外力に対する柔軟性が失われてしまう。そこで、振動的挙動を引き起こす周波数域だけゲインを大きく下げ、その他の周波数域は可能な限り1に近いゲインを保つように設計することは自然な戦略である。具体的には、Fig. 5.8のようにゲイン余裕/位相余裕を欠いている周波数帯のみバンドストップフィルタでゲインを下げ、それ以外の低域と高域のゲインは比較的高く保つ。この制御戦略自体はゲイン余裕/位相余裕に基づくループ整形手法や、ノッチフィルタによる制振制御に見られる一般的なものといえる。

バイラテラル制御系におけるスレーブ側の剛体接触という現象を鑑みると、このループ整形にはより直感的な説明が可能である。エンドエフェクタが剛体と接触し停止するような現象における、理想的なエンドエフェクタ位置と反力の関係はFig. 5.9下段のような波形である。エンドエフェクタと対象の剛体が接触した瞬間は、エンドエフェクタの持つ運動量に応じた衝撃力がパルス状に立ち上がる。その後、重力や操作力による静的な反力を生じながらエンドエフェクタ位置は静止する。しかし、実際はFig. 5.9の上段のように、初期接触時の

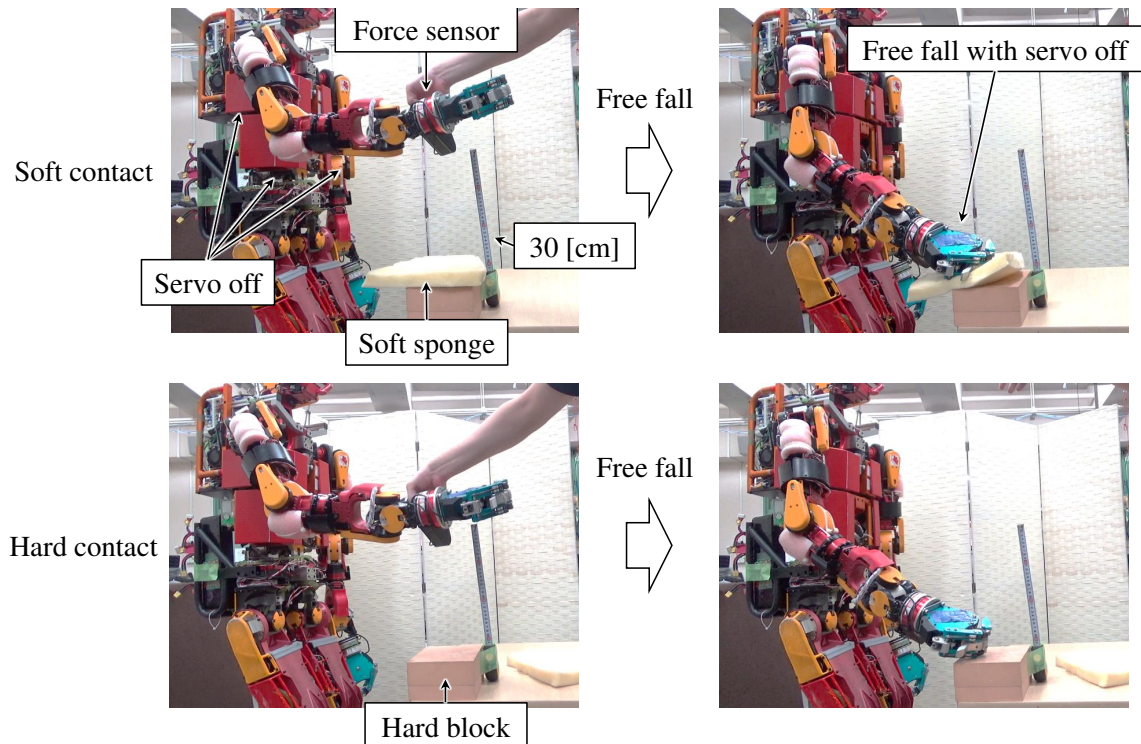


Fig 5.10: The situation of the soft/hard block contact force experiment

パルスの立ち上がり以降も緩やかな振動を伴う。この初期接触後の緩やかな振動が各位相遅れ要素によって生じた共振ともいえる不要な振動であり、周波数域に基づいて大まかに以下のように区別できる。

1. 高域... 物体表面との接触を提示する重要な要素
2. 中域... 共振によって発生している不要な要素
3. 低域... 物体との静的釣り合いを提示する重要な要素

実際には中域の振動といえど、ゲインを下げて破棄していいものではないが、ここでは不安定振動を抑制することのほうが優先される。

実際の機体を用いて、Fig. 5.10のようにエンドエフェクタと剛体を接触させる実験を行った際の力の波形がFig. 5.11である。一般的に、バイラテラル制御系において柔らかい物体との接触は安定でも、硬い物体との接触時に振動的になることは知られている。この実験では

柔らかい物体と硬い物体にスレーブ側のエンドエフェクタを接触させた際に、エンドエフェクタ高さの変遷と、計測された垂直方向の力センサ計測値と、それにバンドストップフィルタとゲイン調整を施したものの波形を計測している。

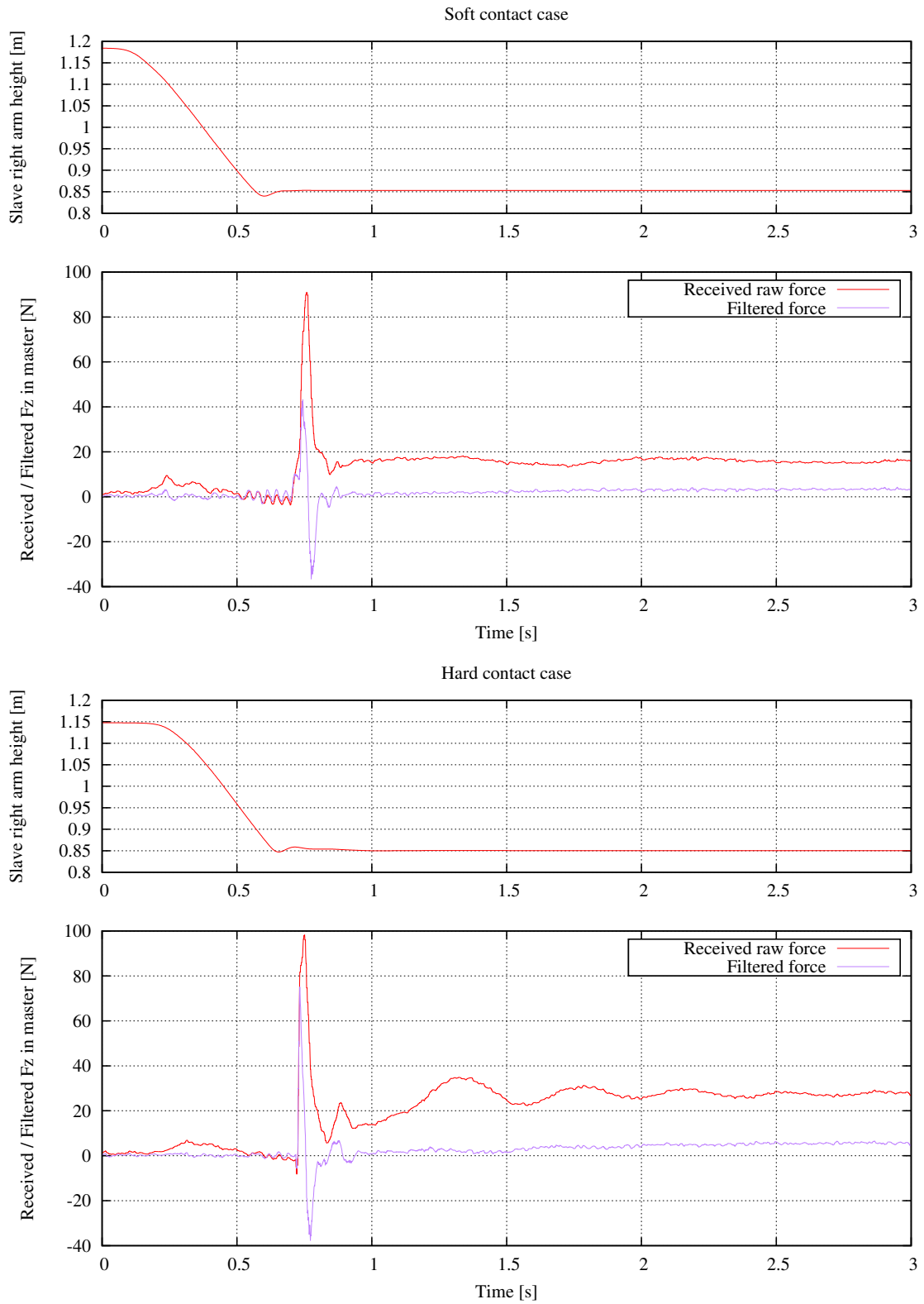


Fig 5.11: A plot of the slave robot hand height and received raw force and filtered force in the soft/hard contact

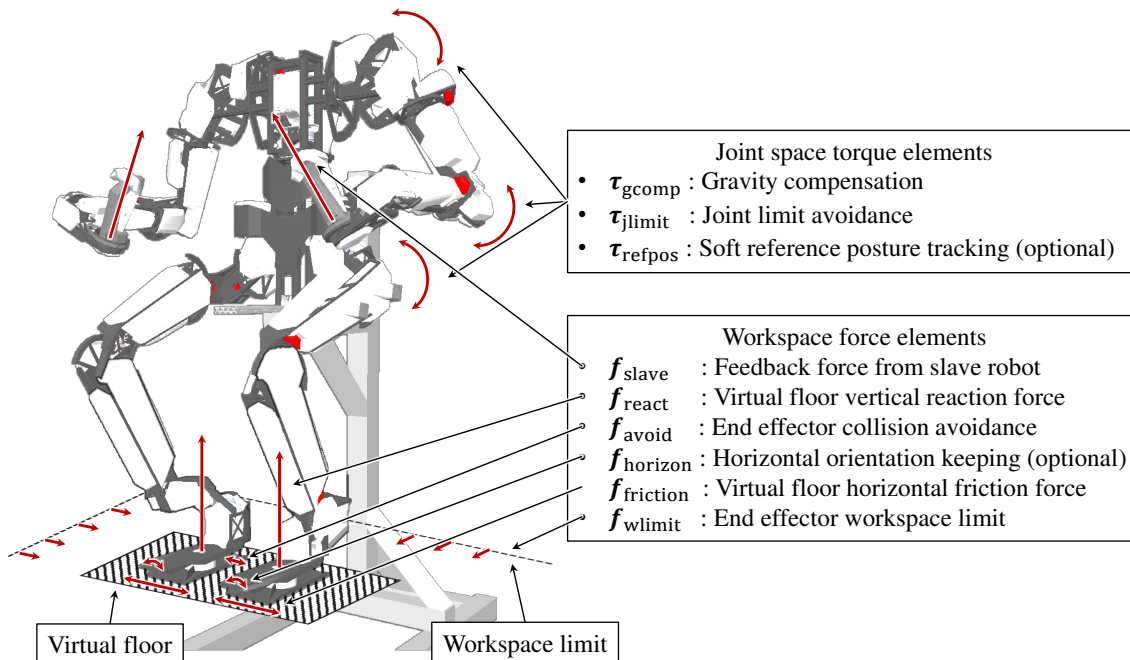


Fig 5.12: Various force and torque elements are included in the torque controller in TABLIS

5.5 歩行操縦用インターフェースとしての操舵反力提示制御

TABLIS をバイラテラル制御システムのマスター側入力デバイスとして駆動する際には、Fig. 5.12 のように多種多様なトルク/力の要素が、関節空間/エンドエフェクタ空間に対して適用されている。各要素の詳細は以下である。

1. τ_{gcomp} ... 逆動力学による重力補償トルク。本研究では速度/加速度項に関しては常に 0 を代入して静学的なつり合い時の重力補償トルクのみを適用している。
2. τ_{jlimit} ... 関節角のハードウェアリミットに衝突しないよう、関節角リミットに近づくにつれ反トルクを発生する。
3. τ_{refpos} ... 操縦者の無操作時に重力補償によってリンクが無抵抗に運動し続けられないよう、十分小さいトルクで基本姿勢に戻るようなトルクを発生させる。不都合な場合は必須ではない。
4. f_{slave} ... スレーブ側ロボットの力センサから取得した 6 軸力を任意のフィルター処理

したもの

5. f_{react} ... 足裏が仮想床面と接触した時の垂直抗力
6. f_{avoid} ... 両足先が互いに衝突しないように設定された反発力
7. f_{horizon} ... 両足先の回転姿勢を常に水平に保つようなトルク。足先は便宜上あえて水平に拘束しているが必須ではない。
8. f_{friction} ... 主に両足先が仮想床面に接している場合に両足間に働く摩擦を再現する力。実際には摩擦条件を考慮しているわけではなく単純に相対位置を拘束している。
9. f_{wlimit} ... エンドエフェクタが必要以上に動き回らないように設定された作業空間制限からの押し戻し力。

各々の力やトルクは簡単な PD 制御で実現されており、これら全ての要素はヤコビアンを用いて以下のように最終的に単純な関節トルクとして加算できる。

$$\tau_{\text{total}} = \tau_{\text{gcomp}} + \tau_{\text{jlimit}} + \tau_{\text{refpos}} + \sum_{i=1}^4 {}^i J^T ({}^i f_{\text{slave}} + {}^i f_{\text{react}} + {}^i f_{\text{avoid}} + {}^i f_{\text{horizon}} + {}^i f_{\text{friction}}) \quad (5.1)$$

ただし、添え字 i は四肢の数え番号である。実際には、加算する前に安全のために各トルクや力の上限值での打ち切りや、加算後の発揮可能トルクによる打ち切りなどが適用されている。このように各機能を個々に追加・調整しやすいシンプルな制御則で記述できるのはトルク制御の一つの利点である。

5.6 搭乗型全身外骨格コックピットによる仮想平面上の歩行テスト

まず、搭乗型全身外骨格コックピット TABLIS の基本性能試験の結果を示す。TABLIS の重要な機能の一つは定点から広範囲の遠隔歩行操縦を実行する歩行インターフェース機能である。そのために、仮想床面からの反力提示と、仮想床面上を歩いた距離のオドメトリ計算が正しく行われている必要がある。Fig. 5.13 のように仮想床面上を前進歩行する実験を行った。その際の内部でのオドメトリの更新状態が Fig. 5.14 である。操縦者の脚運動と連動して妥当な移動オドメトリが進行していることがわかる。Fig. 5.15 は関連する主要なデータをプロットしたものである。“R/L foot pos” は仮想床面上の足先の 3 次元位置，“R/L foot internal ref force” は操縦者に提示する反力として内部で使用されている指令値，“R/L leg joint torque”

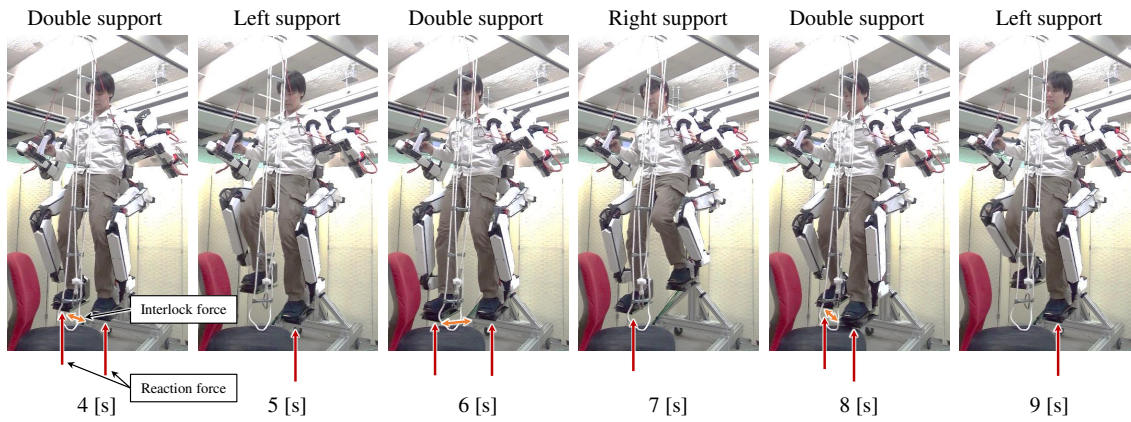


Fig 5.13: Natural constrained locomotion on the virtual floor with TABLIS

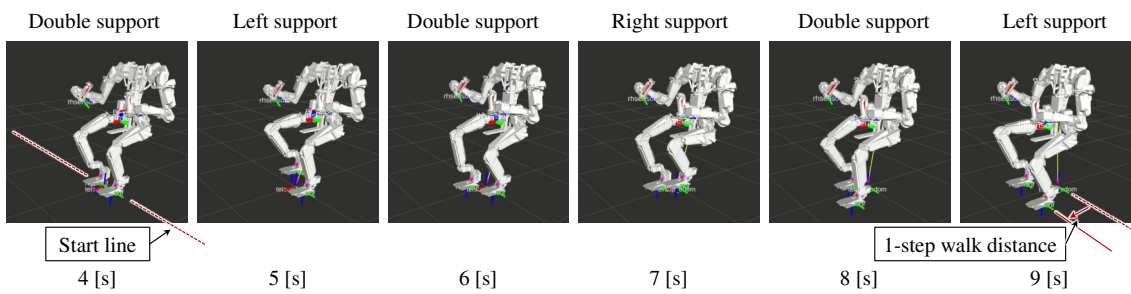


Fig 5.14: The internal odometry transition on the virtual floor

は最終的にモータードライバに送信されたトルク指令値である。このグラフで確認できる重要な点を以下に挙げる。

1. 足先高さ Z が遊脚期間以外は高さ 0 付近に拘束されている。
2. 足先高さが 0 付近の期間は仮想床面からの F_z 方向反力が立ち上がっている。
3. F_x, F_y は両足間の相対位置の拘束力であり、作用・反作用の関係で常に正負反転して立ち上がっている。
4. 前進歩行なので足先位置 X は徐々に増加していく。
5. 前進歩行なので F_y に比べて F_x がより顕著に変動する。

6. Fz 方向に大きな力を発生している瞬間は股関節 Pitch 軸に 100 Nm 程要求されており、空冷無しの定格トルク 66 Nm を超えている。

搭乗型であるので、片足に全体重をかけるような運用は想定していないが、片足に 20 kgf 程度の反力であれば十分問題なく発揮できており、脚用のカフィードバックデバイスとしての機能を果たす能力を有していると言える。

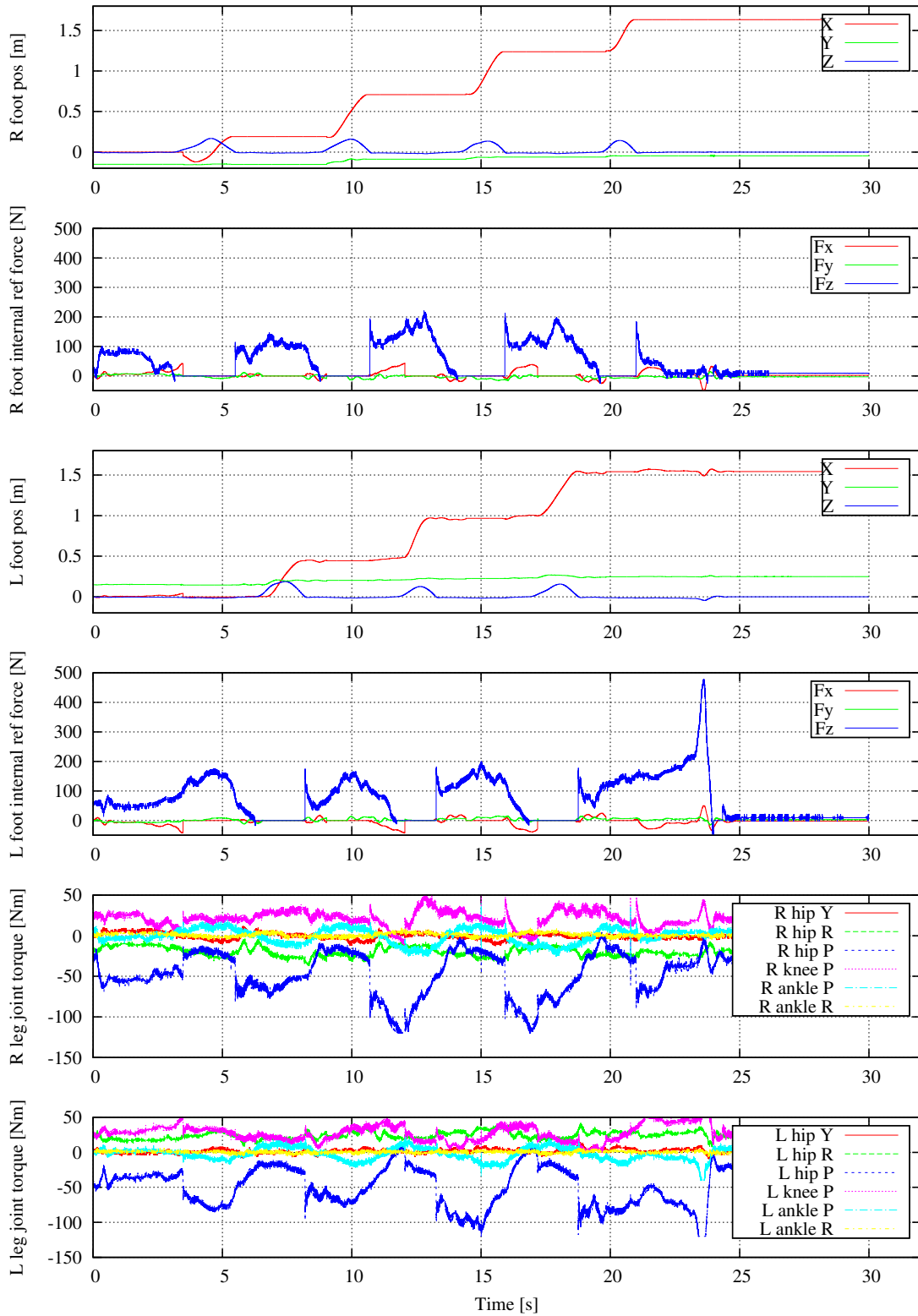


Fig 5.15: Feet odometry and internal reference forces and final command torques

5.7 歩行操縦用インターフェースとしての操舵反力特性と従来手法に関する議論

バイラテラル制御手法を適用したロボットアームシステムが物体操作等に有効であると認知されているが、双腕を用いて重量物を把持する場合などに、双腕間での内力の振動的挙動や、重量物の慣性の影響などによってバイラテラルシステムの操縦が困難になることは十分に認知されていない。バイラテラル制御下にある複数のスレーブアーム間で不要な内力の発生を防ぐためには、把持物体の形状や所望のタスクの成功条件などの事前情報に基づいて、各スレーブアームのエンドエフェクタ間に何らかの拘束条件を設定することが有効であり、この考え方を小菅らは“Task-Oriented”と表現している [74].

本研究において導入してきた二脚動力学アシスト手法や歩行操縦用インターフェースとしての操舵反力提示制御は、バイラテラル双腕マニピュレーションにおける Task-Oriented なアプローチを、バイラテラル二足歩行に対して適用したものと説明できる。

バイラテラル双腕マニピュレーションの例では、対象物を両手エンドエフェクタで把持した後は両手の相対姿勢を固定するなどの手法が考えられる。また、対象物を押し潰したりしないよう、一定以上の双腕による挟み込み力の制限や、両手間の距離の制限などを与えるなども考えられる。本研究においても、両足間の内力の抑制のために両足着地状態での両足裏の相対姿勢を拘束したり、足裏着地時の着地衝撃を緩和するために垂直方向の着地速度を制限したりしている。また、足裏反力や着地タイミングをバイラテラル制御によって直接操作するのではなく、二脚動力学アシストによる重心速度制限、着地タイミング制限によって拘束するという手法も、二足歩行というタスク目標に対する Task-Oriented なアプローチであると整理できる。

5.8 本章のまとめ

本章ではヒューマノイドロボットの全身バイラテラル操縦において、そのシステム全体に点在し不安定挙動を引き起こす要素の説明と、それらによる不安定挙動を回避しつつ、可能な限り良好な操舵反力特性を得られるような操舵反力提示制御の手法について述べた。多自由度かつ複雑なヒューマノイドロボットの全身バイラテラル制御システムにおいては、無視できない大きさの通信遅延や機構インピーダンスの影響が生ずるため、マスタ・スレーブ間で単純なバイラテラル制御系を構築するだけでは単純なタスクでさえ実行できない。本研究

では二足歩行に特化した、ある種の Task-Oriented な操舵反力提示制御を設定することで不安定挙動の回避や操縦難度の解消を行うことで、ヒューマノイドロボットの全身バイラテラル操縦の安定性を高めている。

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

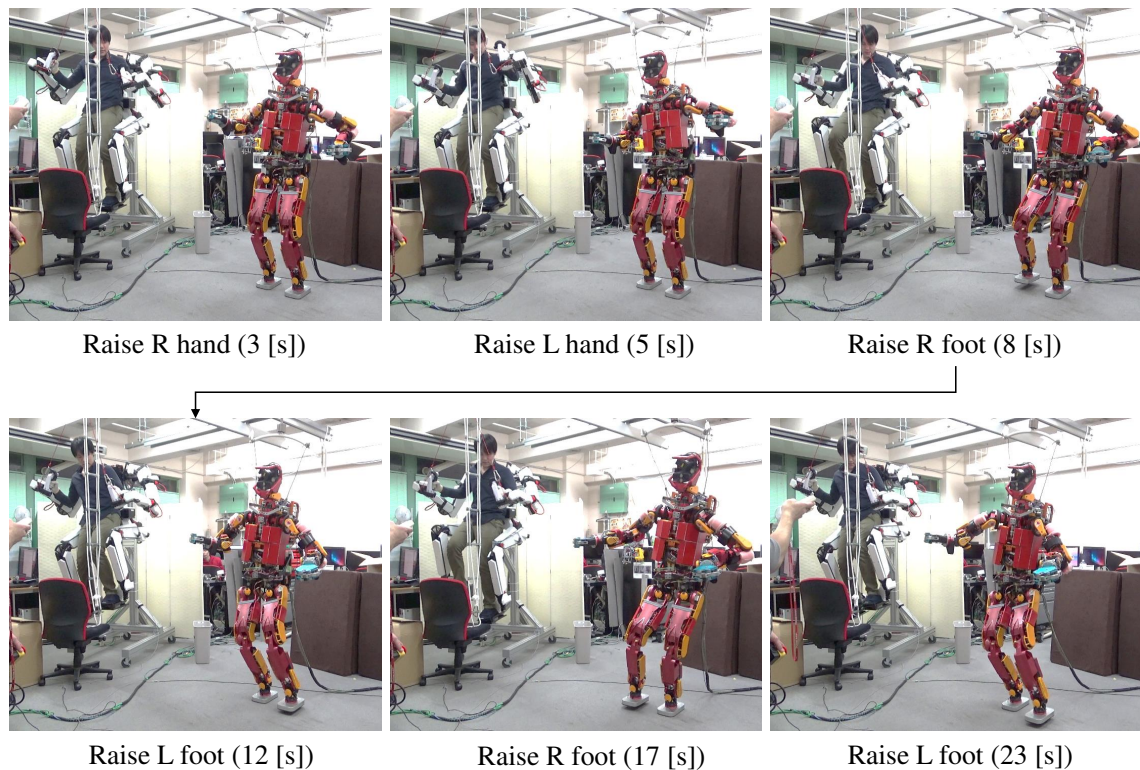


Fig 6.1: Whole body master slave operation verification with TABLIS and JAXON

6.1 搭乗型全身外骨格コックピットによる全身バイラテラル操縦テスト

TABLIS と JAXON を接続して Fig. 6.1 のような全身運動テストを行った際の結果を示す。Fig. 6.2, Fig. 6.3 はマスタ・スレーブで動作するマスタ側とスレーブ側の手足の位置である。足幅や両手の幅などの基本姿勢におけるエンドエフェクタの初期位置が異なるため、マスタ側とスレーブ側の位置は完全に一致せず、常に一定のオフセットが乗ったまま変遷する。また、開始位置も必ずしも零点ではないため、Y 軸方向の値も左右対称ではない。この2つのグラフで読み取れることは以下である。

1. 足先高さ Z は自動遊脚接地制御や重心移動に要する時間が影響するため、マスタ側の指令に対して 2 s 程遅れ、高さも十分上がらない。
2. 自動遊脚接地制御によって足上げ期間は大幅に制限されるが、その短い期間でも目標

の水平方向(主に X 方向)の目標移動量は達成できている。

3. 手先の Z 方向高さの変遷から，手先エンドエフェクタの追従遅れは 0.2~0.3 s 程度。

関節空間での速度制約を考慮したスプライン補間によって短時間でも無理なく高速に目標に到達できるため，一瞬の足上げ時間でも地面を擦るように XY 方向の目標位置に到達でき，所望の歩行が達成できる。また，ある足上げ期間中に目標 XY 位置に到達できなくとも，次の足上げ期間中に挽回することも可能である。Fig. 6.4 は足裏反力や重心-ZMP に関するパラメータの変遷である。このグラフからは以下のことが読み取れる。

1. マスタ側の足が上がった瞬間はスレーブ側の足はまだ接地したままだが，重心移動に伴う左右の反力の変化は始まっている。
2. スレーブ側が片足立ちで全体重の 1200 N 受けるのと同じように，マスタ側は仮想平面から 200 N 受けている。
3. スレーブ側での指令重心位置に対して，実機 IMU から計算した Capture Point は進行方向前方に，実機足裏 6 軸力センサから計測した ZMP は進行方向後方に，妥当な挙動をしている。

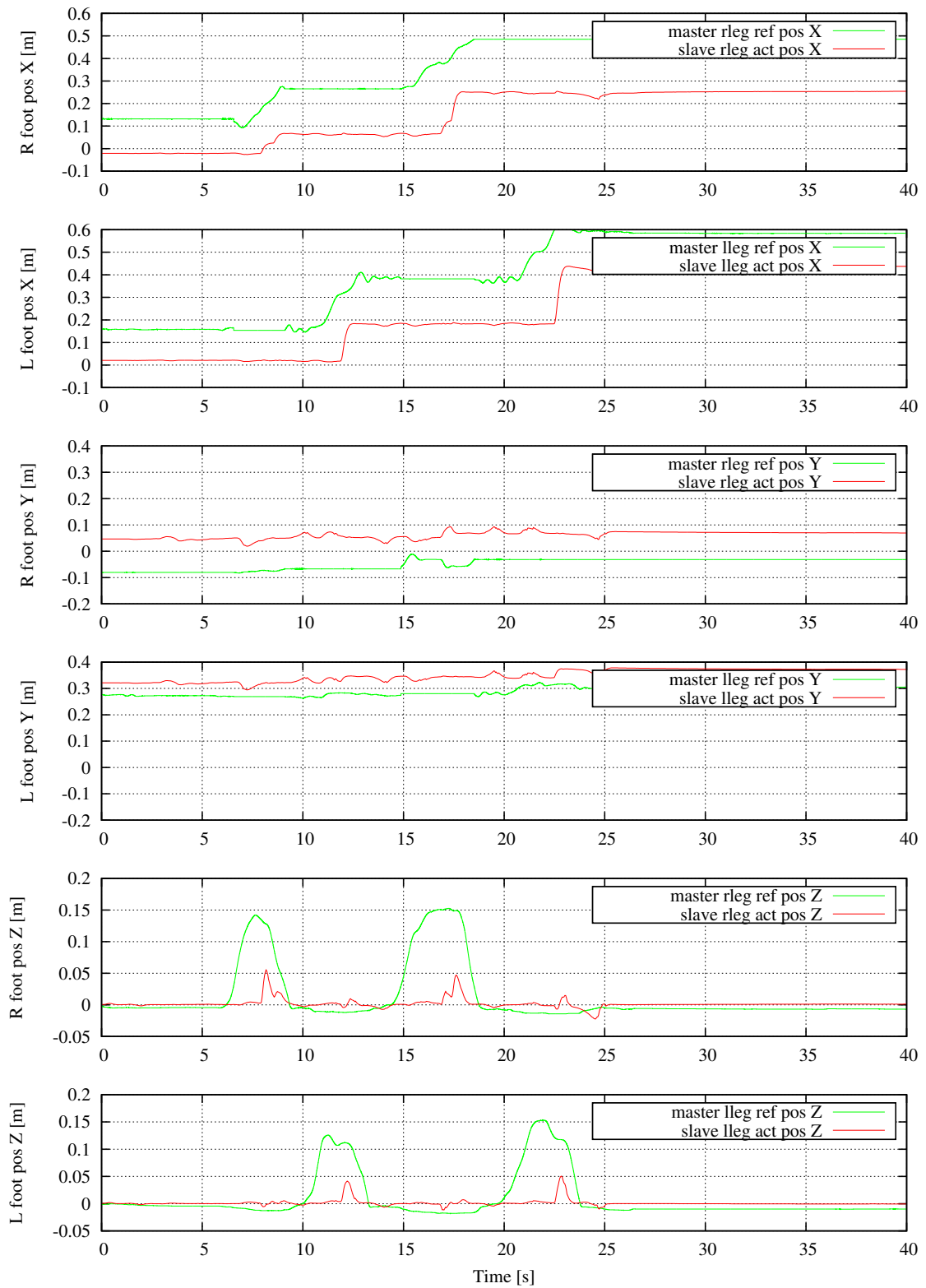


Fig 6.2: Foot position response from master to slave during the whole body master slave operation verification with TABLIS and JAXON

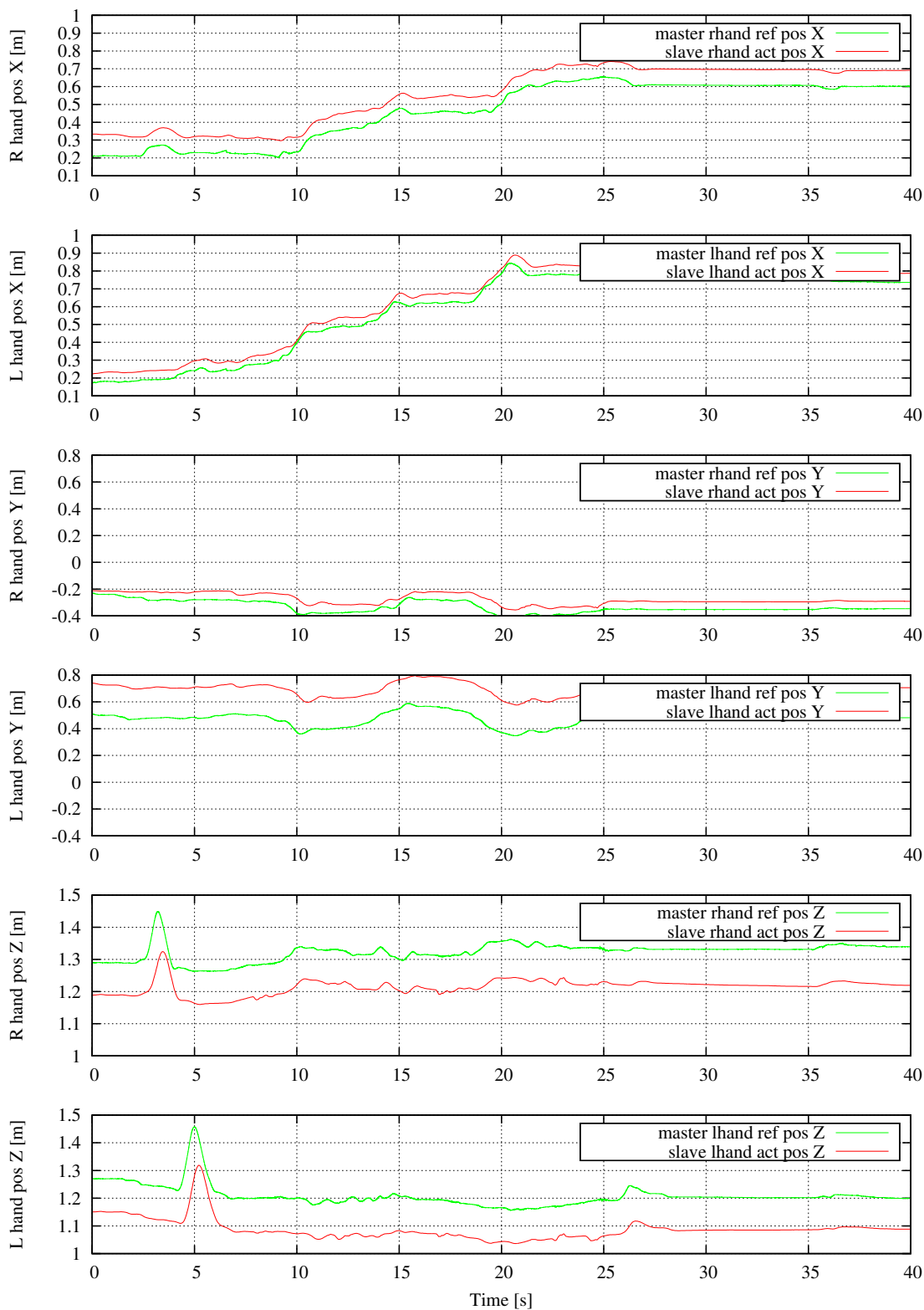


Fig 6.3: Hand position response from master to slave during the whole body master slave operation verification with TABLIS and JAXON

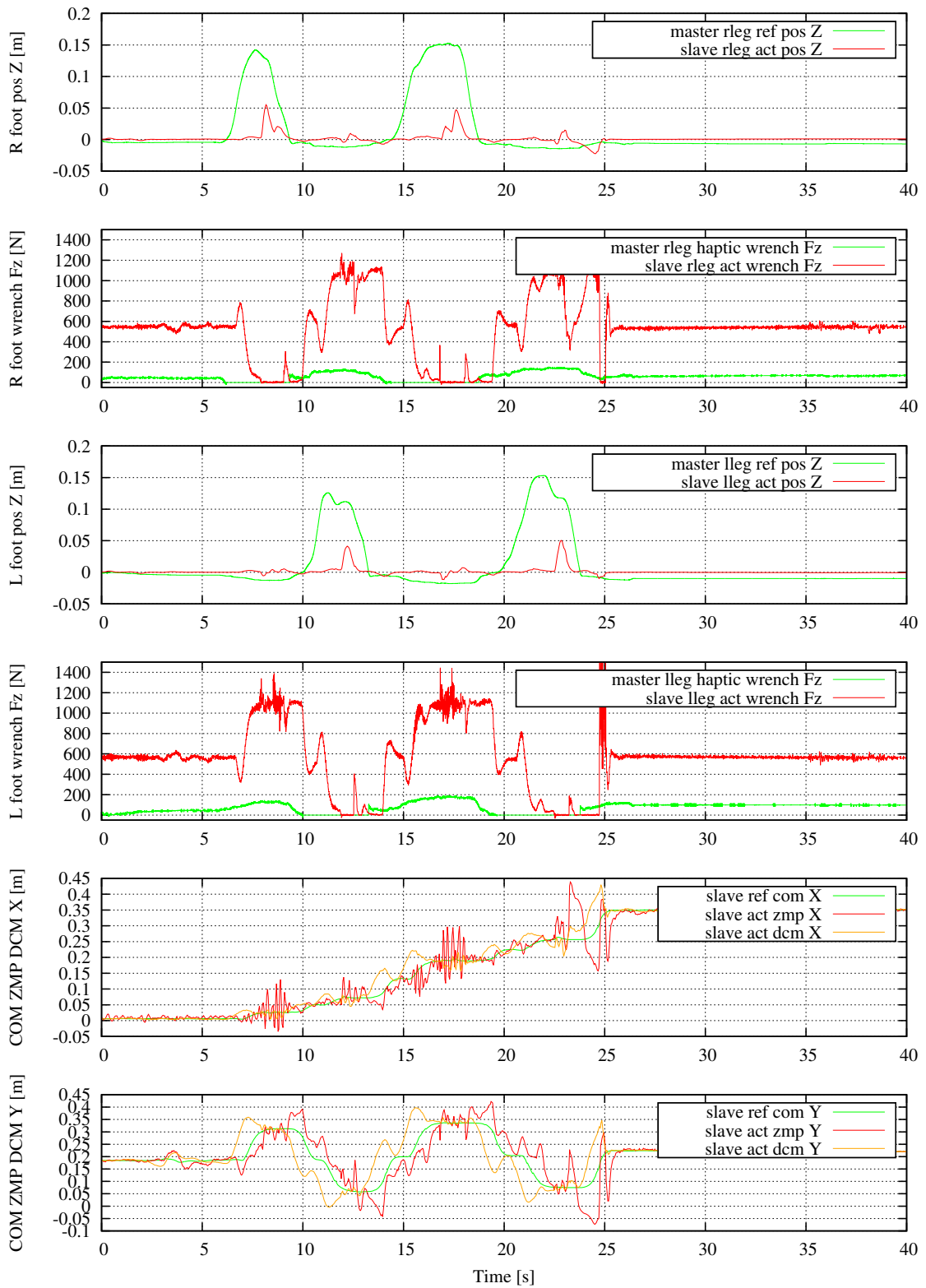


Fig 6.4: Foot reaction force and slave gait parameters transition during the whole body master slave operation verification with TABLIS and JAXON

ここまで確認された全身のバイラテラル操縦を応用すると、Fig. 6.5 の家事タスクのような軽作業を遠隔遂行することが出来る。この実験では、机の下を掃除機掛けするために手で座椅子をどけ、空いたスペースに立ち入って掃除機掛けをするという一連の動作を実行した。マニピュレーションを含むと、掃除機を持ちながら脚移動や、足先を利用した座椅子の移動など、四肢の力覚を同時に駆使する全身協調動作の例となっている。



Fig 6.5: Sample house work operation with the whole body bilateral tele-operation system

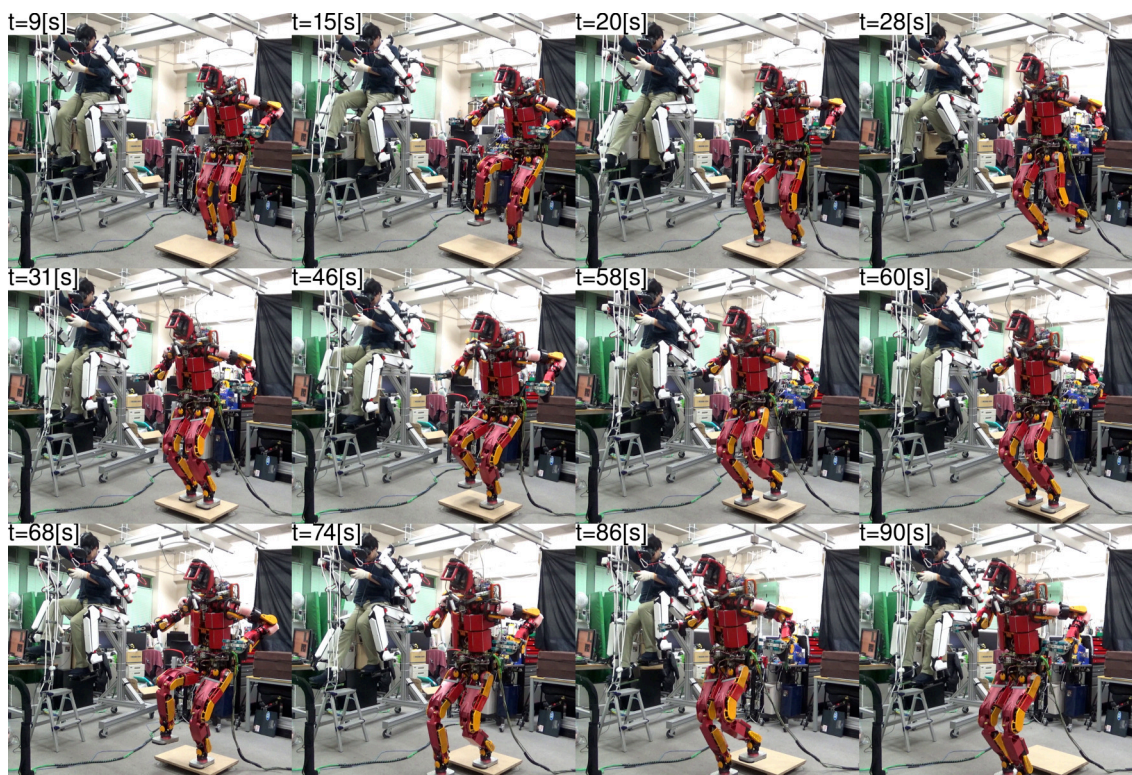


Fig 6.6: Unknown height step traverse with the sole height haptic feedback (step height = 0.07 m)

6.2 未知環境形状を知覚可能な脚部の操舵反力特性の検証

TABLISの四肢のカフィードバック機能を利用すると、ある程度のバイラテラル二足歩行が可能になる。本研究で議論を進めてきた通り、直接的に脚の6軸力をバイラテラルに同期するだけでは、操縦システムとしての十分な安定性が達成されないため、何らかのアシスト制御や Task-Oriented な制御実装にする必要がある。本実験では第3章で述べた二脚動力学アシスト制御に加えて、以下のような追加実装を行うことで、Fig. 6.6のような未知の水平段差の高さを操縦者に提示しつつ踏破できるようになる。

1. スレーブ側ロボットの足裏センサの垂直反力が閾値(数十N)を超えたら床面検出とみなす
2. スレーブ側ロボットからのフィードバック情報に左右の足で検出している床面高さ情報を追加する

3. マスタ側コックピットで受け取ったスレーブ側床面高さに応じた接触反力を提示する
4. 未知段差との衝突衝撃を抑制するために足下げ制限速度や重心移動速度を下げる

理想的な関節トルク制御ロボットであれば、未知の路面形状に対しても高いバックドライバビリティによって馴染むことが出来るが、バックドライバビリティの低い位置制御ロボットと足裏力センサの組み合わせによる力制御系では、その制御性能によって路面衝突時の衝撃吸収能力に限界がある。そのため、常に高さ0の平面歩行時に比べて、未知高さの段差を含む路面歩行時は歩行動作の動的パフォーマンスを大きく抑制する必要がある。本実験では平面歩行時の足下げ制限速度 0.4 m/s, 重心移動カットオフ周波数 1.0 Hz を、足下げ制限速度 0.1 m/s, 重心移動カットオフ周波数 0.4 Hz まで落として実行している。実行時のデータが Fig. 6.7 である。この実験では、操縦者の重心運動は利用していないため、グラフ中の“master com ref pos Y”は値がほぼ変動しない。目標重心位置は両足支持期間では両足裏原点の中心、片足支持期間では支持脚原点に設定されており、そのステップ状の目標重心軌道は DCM/CCM による重心速度制限を適用された後に“slave com act pos Y”のように実行される。グラフ中 2,3 段目のグラフでは段差に着地時にマスタ側、スレーブ側共に足裏高さが段差によって拘束されている様子がわかる。本実験で踏破した段差の高さは 0.07m であるが、姿勢の誤差や機構のたわみによって 0.1m 程に検出されている。足裏反力による路面検出閾値 50 N, 検出した路面高さをリセットする閾値 30 N, 路面高さリセットに要する最低時間を 2 s と設定しているため、遊脚期間中には検出路面高さは一旦 0 に戻る。Fig. 6.8 は操縦者がスレーブ側ロボットのカメラを通じて見ている画像であるが、スレーブ側ロボットの関節可動域や自由度構成によって、足元を十分に視認しながら踏破することが難しい傾向にあることがわかる。

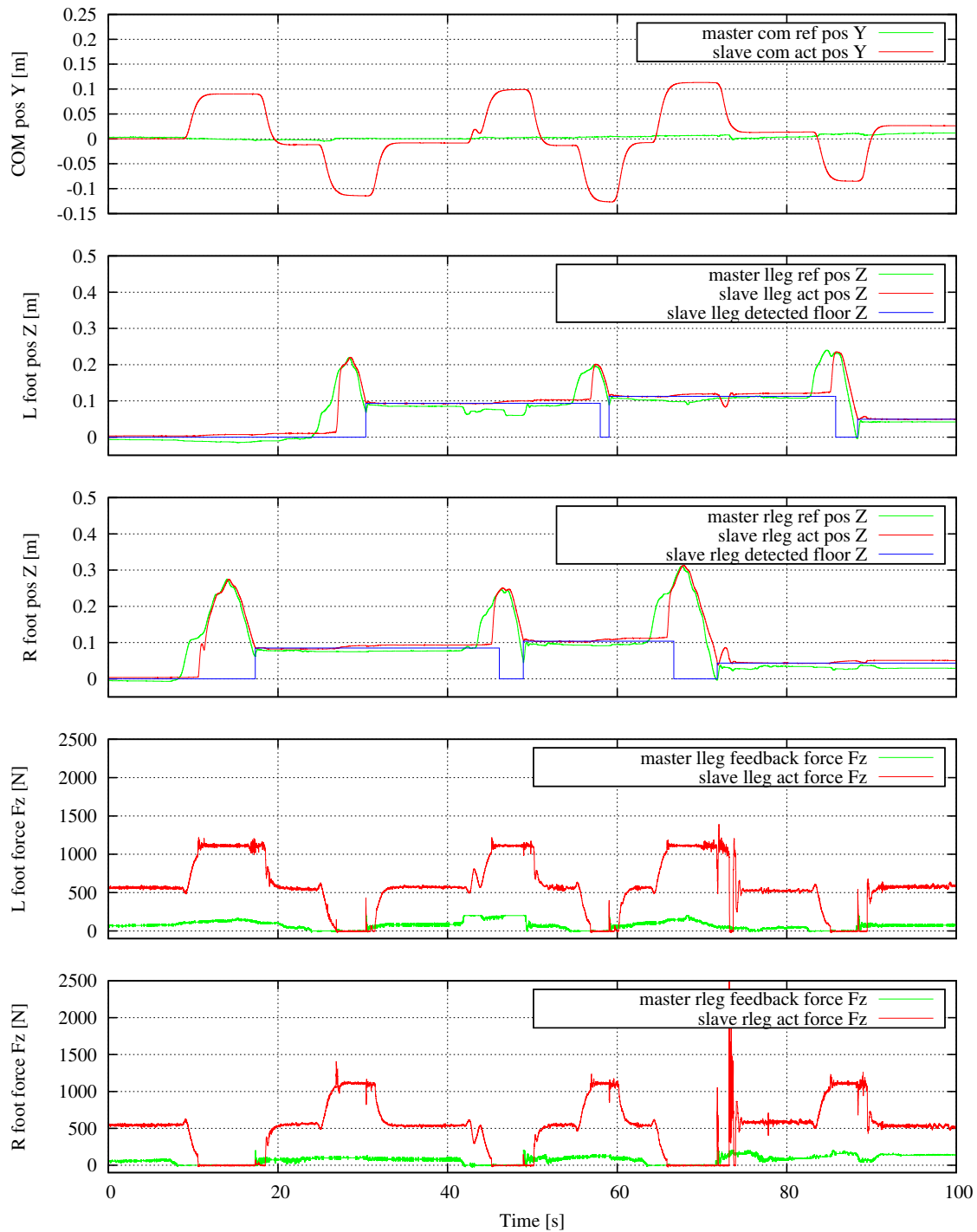


Fig 6.7: COM, feet height, detected floor height, feet force plot of the step traverse operation

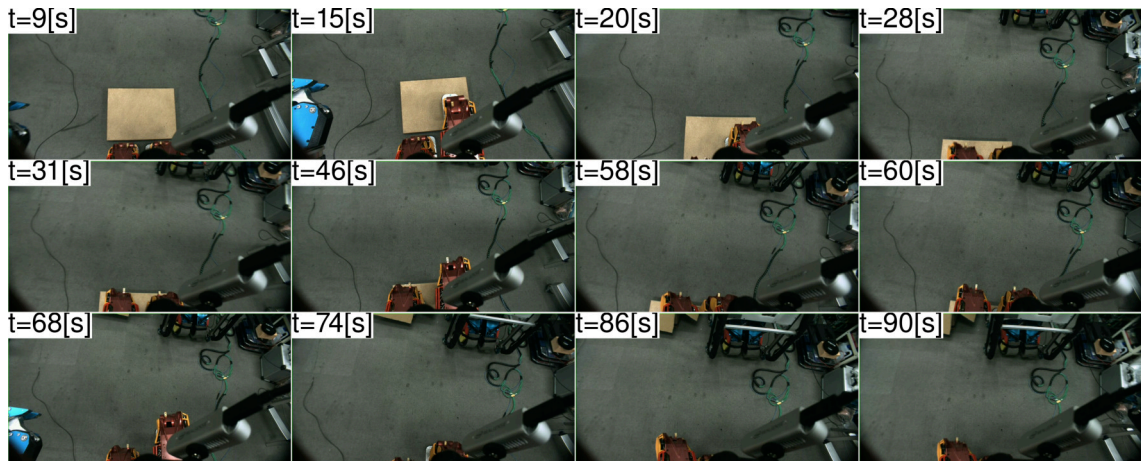


Fig 6.8: The view through the HMD during the step traverse operation

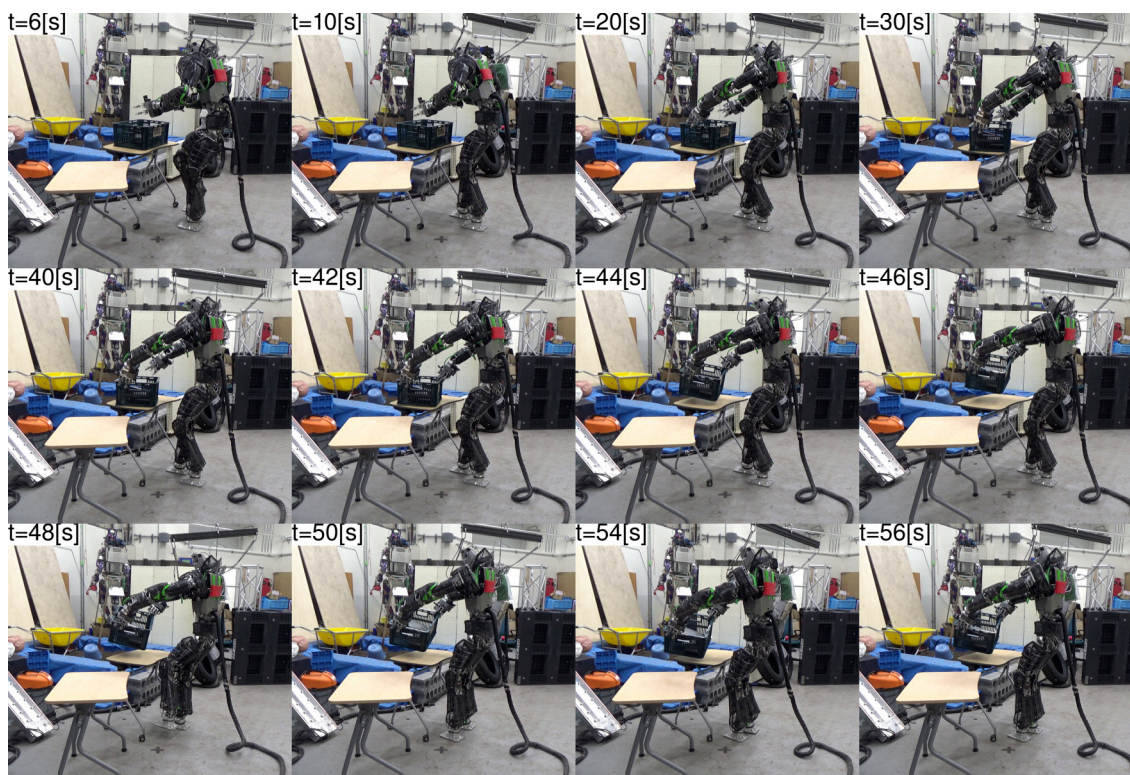


Fig 6.9: Recorded video shots of the light weight bilateral dual arm manipulation

6.3 通常の双腕バイラテラル制御による双腕双脚物体運搬

本実験では川崎重工製の Robust Humanoid Platform (RHP) シリーズ [75] の改良版である RHP4B を操縦対象として、直線距離で 150m ほど物理的に離れた場所にある遠隔実験場で、遠隔全身作業を試みる。Fig. 6.9 は合計 2.5kg 程度のかごを両手で持ち上げる様子である。操縦者は Fig. 6.10 のような単眼カメラ画像を HMD を通じて見ながら、対象物に接近して把持する。Fig. 6.11 が一連の動作時の両足、両手の力センサ値である。保存データ形式の都合上このグラフの力センサ値は“Hand local coord Fx”等のように手先足先座標系から見た値で表記されている。オレンジ色で着色されている区間が双腕マニピュレーションを行っている期間であり、この試行で持ち上げた対象物は比較的軽量であるため、手先力センサの問題なく持ち上がっている。

一方、Fig. 6.12 では 7kg 程度の大型重量物を両手で持ち上げようと試行した実験である。重量がある剛体かつ大型の為、単純なバイラテラル両手マニピュレーションでは対象物の振

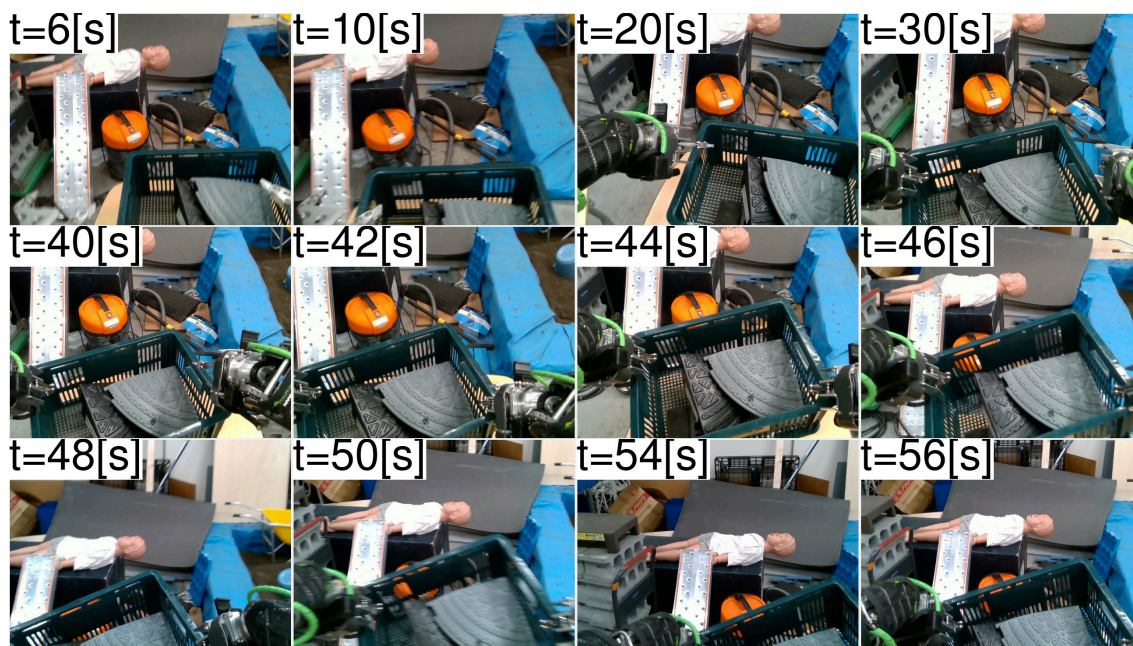


Fig 6.10: The view through the HMD during the light weight bilateral dual arm manipulation

動や揺れ、内力の発生などの影響が大きく、Fig. 6.14 のオレンジ色に着色された区間で把持した大型対象物の影響が転倒に繋がっている。保存データ形式の都合上このグラフの力センサ値は手先足先座標系から見た値であることに注意されたい。特に 50s 以降は両手の $F_x \sim F_z$ に現れた振動的な波形が徐々に振幅を増して発散している様子がわかる。このように、双腕ひいては全身バイラテラル遠隔操縦において、実際の作業で取り扱うような重量物を操作するためには、より安定性を確保できる制御モードの必要性が示唆される。



Fig 6.11: End effector force plot of the light weight bilateral dual arm manipulation



Fig 6.12: Recorded video shots of the heavy weight bilateral dual arm manipulation



Fig 6.13: The view through the HMD during the heavy weight bilateral dual arm manipulation



Fig 6.14: End effector force plot of the heavy weight bilateral dual arm manipulation

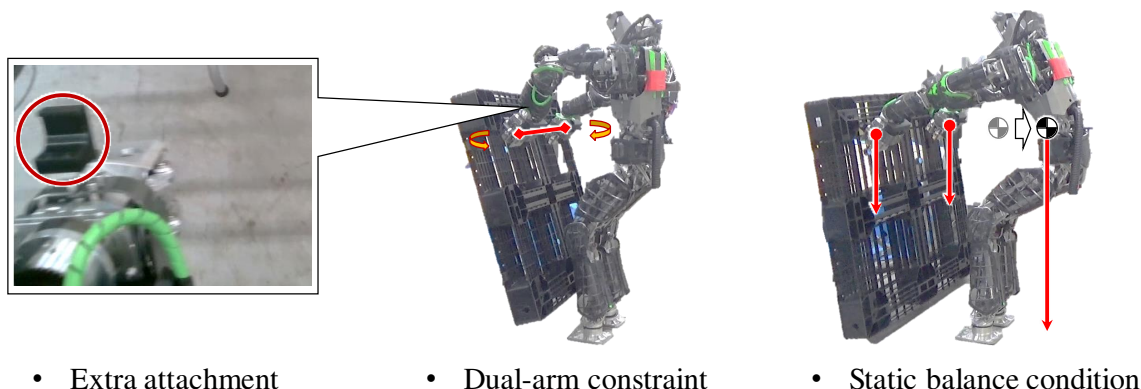


Fig 6.15: Extra Task-Oriented bilateral control mode for large heavy object manipulation

6.4 大型重量物運搬に Task-Oriented なバイラテラル制御による双腕 双脚物体運搬

以降の実験では Fig. 6.15 のように双腕による大型重量物運搬に特化した Task-Oriented な拘束を加えた制御モードで実験を行う。

Fig. 6.16 は 7kg 程度の貨物用パレットを両手で持ち上げ運搬する様子であり， Fig. 6.17 は HMD を通じたカメラ画像， Fig. 6.18 が一連の動作に関する主要なデータのグラフである。オレンジ色で着色されている区間が双腕マニピュレーションを行っている期間を表している。 Fig. 6.16 から分かるように， Fig. 6.12 では持ち上げることのできなかつたパレットを持ち上げ， 双腕双脚で運搬動作が実行可能になっている。 Fig. 6.18 の “Hand force” の “Fx”～“Fz” に注目すると， まず， Fz に合計 70～80N の荷重が加わっており， これがパレットの重量に相当する。 Fx に関して定常的に 20N 値が乗っている理由は， 手首に取り付けられた力センサの先に取り付けられたハンド部の重量が姿勢によって計測されるためである。ここで問題となるのは， Fx， Fy において正負の反転した内力と思われる波形が見受けられることである。実際， 操縦中のコックピットにも不可解なフィードバック力が感じられた。これは局所的に被操縦側のロボットの運動学の限界に達している為であると考えられる。両手， 両足， 重心， 頭を目標姿勢に拘束すると， 姿勢によっていずれかの拘束条件が厳密には満たされない状況が発生する。本システムでは特に， 姿勢維持に関わる両足と重心の拘束の重みに対して， 両手や頭の姿勢拘束の重みは低く設定されているため， 全身姿勢の可解性が低くなれば両手の相対距離の拘束が満たされない場合が出てくる。しかし実際には， 局所的に内力が発

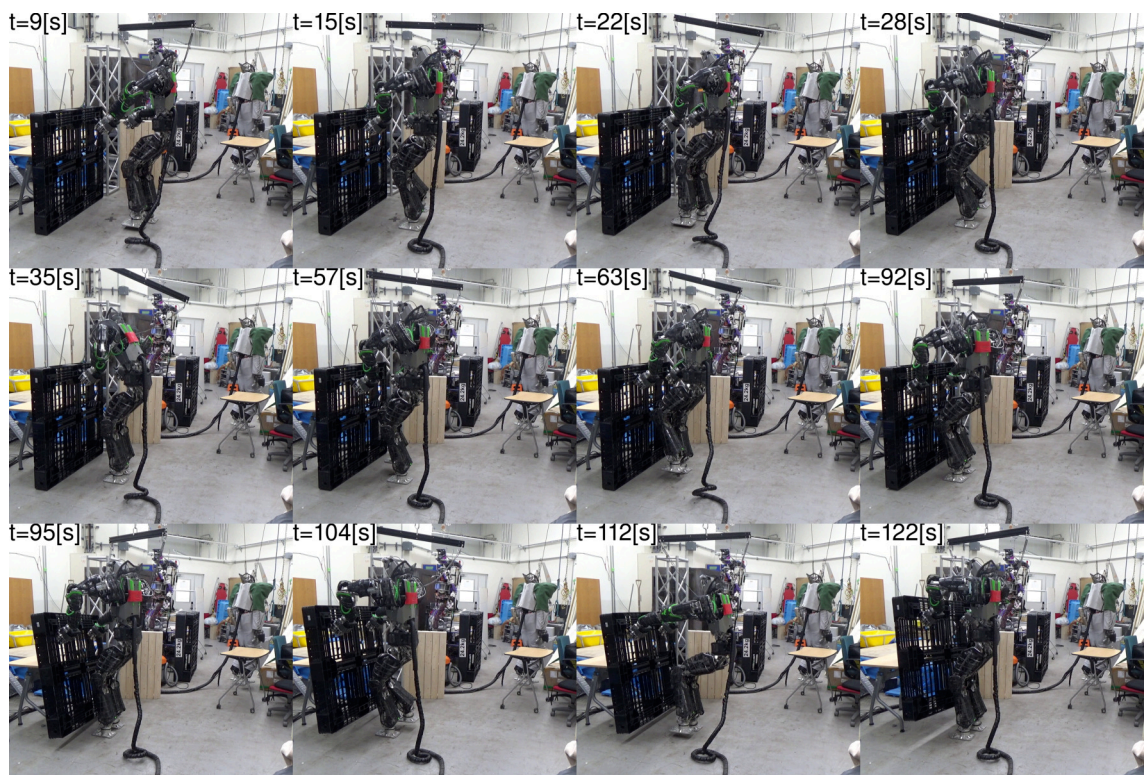


Fig 6.16: Recorded video shots of the heavy weight Task-Oriented bilateral dual arm manipulation with pallet

生ずる区間があろうとも、両手の相対距離の拘束によって内力が振動的になり発散する事態は抑制されており、Task-Orientedなバイラテラル制御モードが双腕による大型重量物運搬の安定性に貢献していることは確認できる。Fig. 6.19, Fig. 6.20, Fig. 6.21 は対象物を 6.5kg 程度のトラス状の構造物に変更して試行したものであり、同様に局所的な内力の発生が確認されるものの、それらが振動的になり発散することはなかった。

6.5 実際の遠隔作業遂行において必要とされる操舵反力特性

ネットワークの性能低下が避けられない実際の遠隔環境下において、実際にスレーブ側に生じている接触反力をそのまま再現することは難しく、大きくゲインを落としたり、周波数整形を要するなどのバイラテラル制御システムの性能(透明性)低下が避けられない。そのため、実環境で安定に動作させるためには、何らかの特殊なフィードバックルールを設けるこ

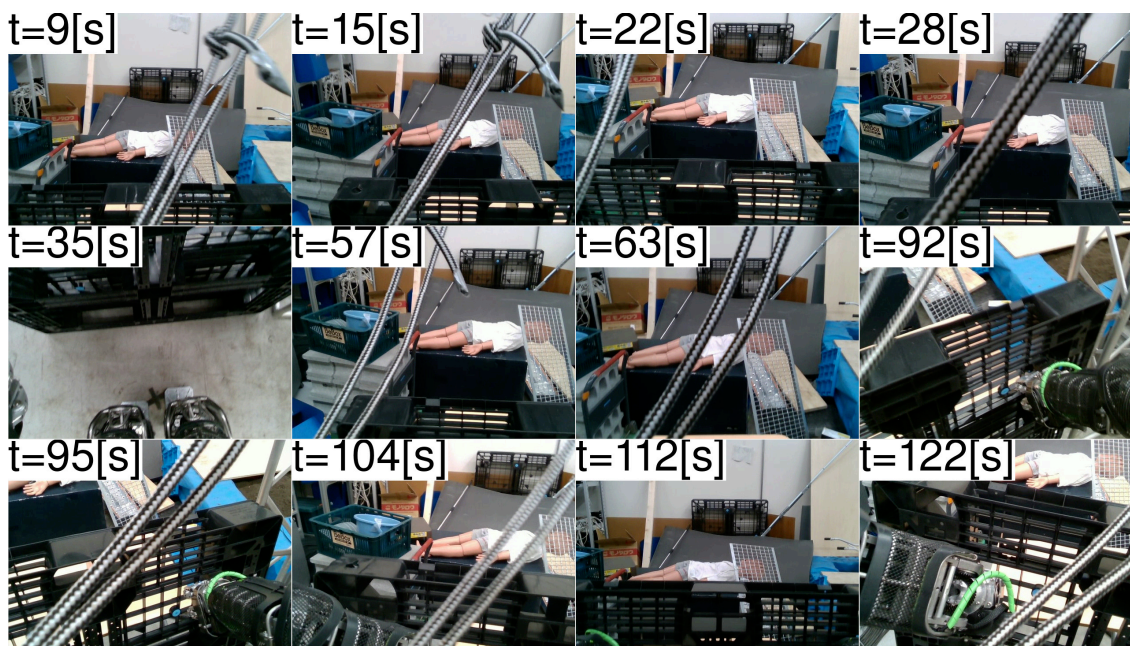


Fig 6.17: The view through the HMD during the heavy weight Task-Oriented bilateral dual arm manipulation with pallet

とも少なくない。具体的には、物体の表面性状や剛体衝突のインパルス波形などの高周波の振動は、カフィードバック系の安定性への悪影響が少ないため、物理的拘束を持つカフィードバックデバイスではなく、データグローブと振動スピーカユニット等を用いた高周波振動のみのフィードバックシステムを採用することも可能である。このアプローチは、物体マニピュレーションにおいて触覚の占める役割が大きいという考えに基づけば合理的かつ本質を突いていると言える。

本研究の全身バイラテラル操縦システムでは高周波成分を主に取り出したカフィードバックに加えて、別途、両足の環境接地拘束を再現するために仮想平面との接触反力制御を TABLIS 単体の制御ループ内で再現している。これはスレーブ側ロボットの両足反力をそのままマスタ側に再現すれば不安定振動を生じる為であるが、このアプローチも、スレーブ側ロボットの環境拘束をマスタ側に再現する際に、本質的にフィードバックすべきは内力や反力そのものではなく接触拘束条件である、という主張に発展していくのではないかと考えている。

もちろん、把持している物体の重さそのものを知覚したい等の状況も考えられるため、スレーブ側のエンドエフェクタ反力の忠実な再現を放棄して良いことにはならないが、高周波

域はそのままフィードバックして触覚を再現し，低周波域は Task-Oriented な仮想拘束として再現する，という組み合わせは，遠隔作業における触覚と環境拘束を限られた性能条件下で疑似的であれど本質的に再現する合理的な手法ではないかと考えている。

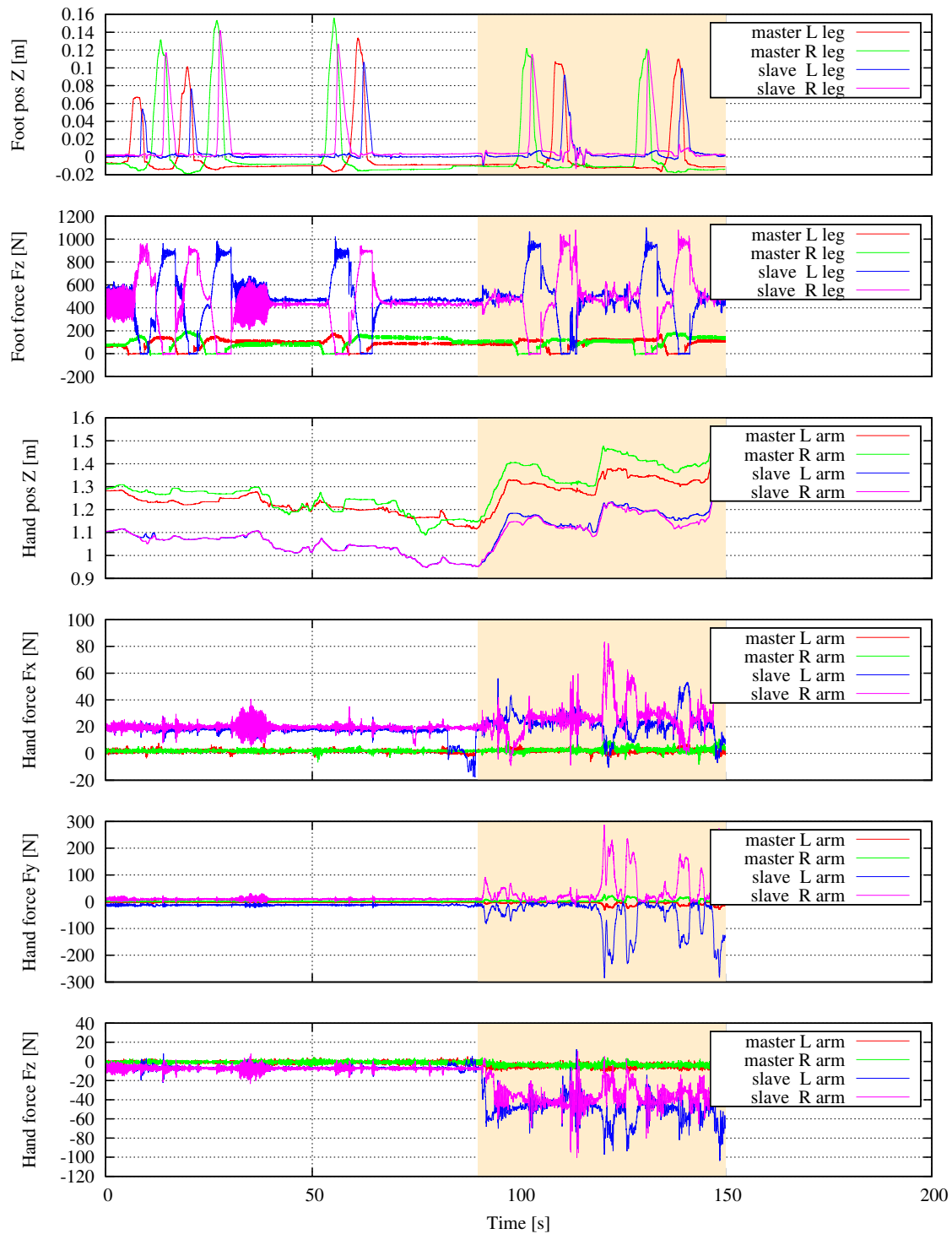


Fig 6.18: End effector pose and force plot of the heavy weight Task-Oriented bilateral dual arm manipulation with pallet

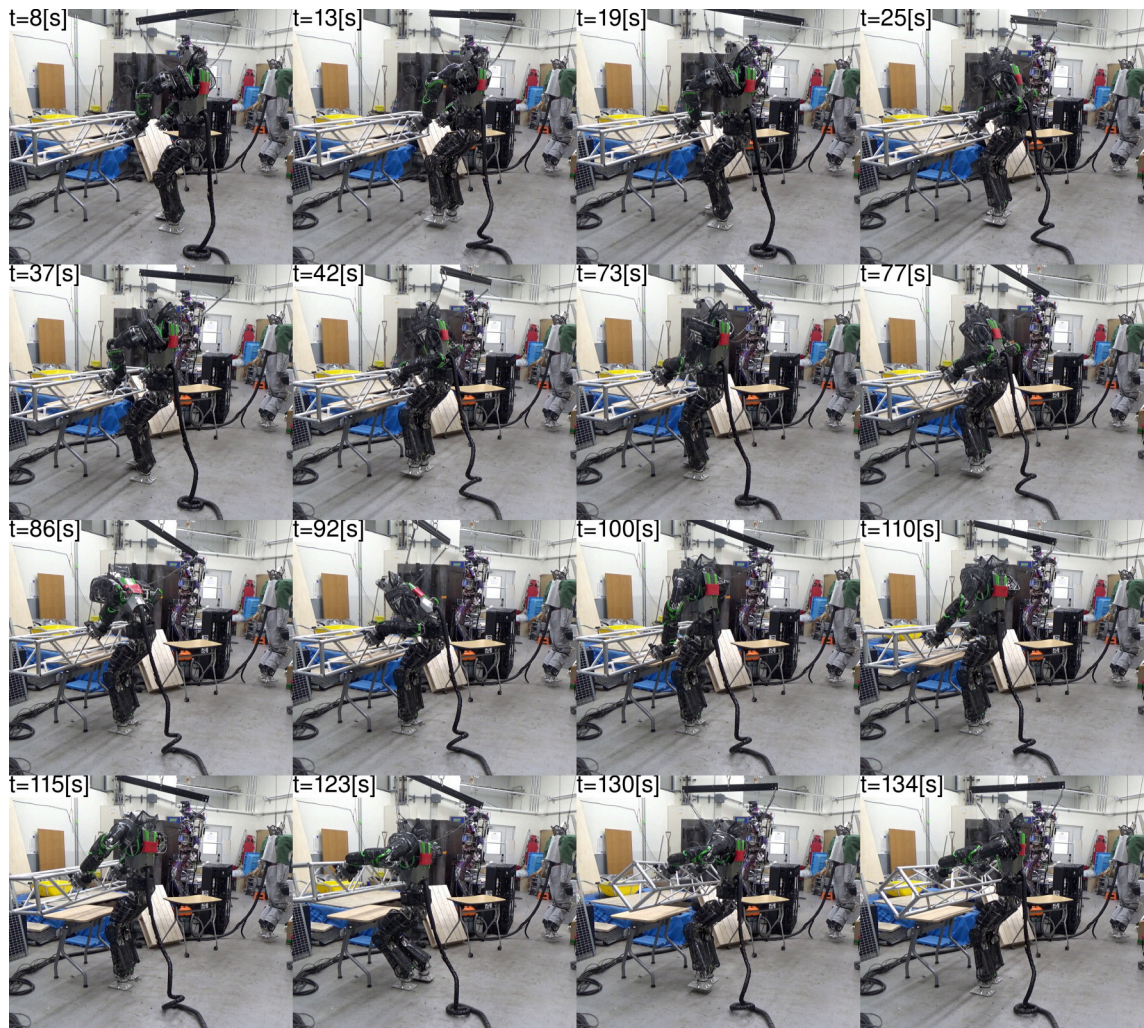


Fig 6.19: Recorded video shots of the heavy weight Task-Oriented bilateral dual arm manipulation with truss

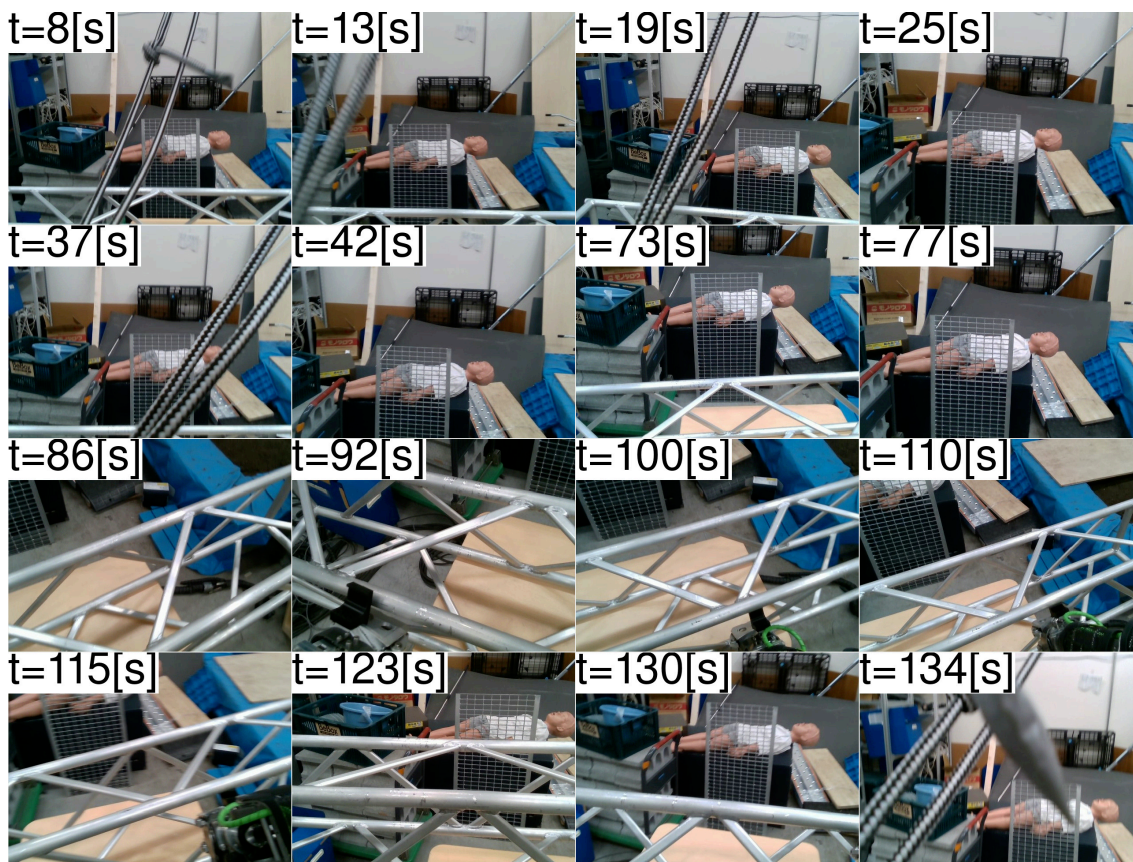


Fig 6.20: The view through the HMD during the heavy weight Task-Oriented bilateral dual arm manipulation with truss

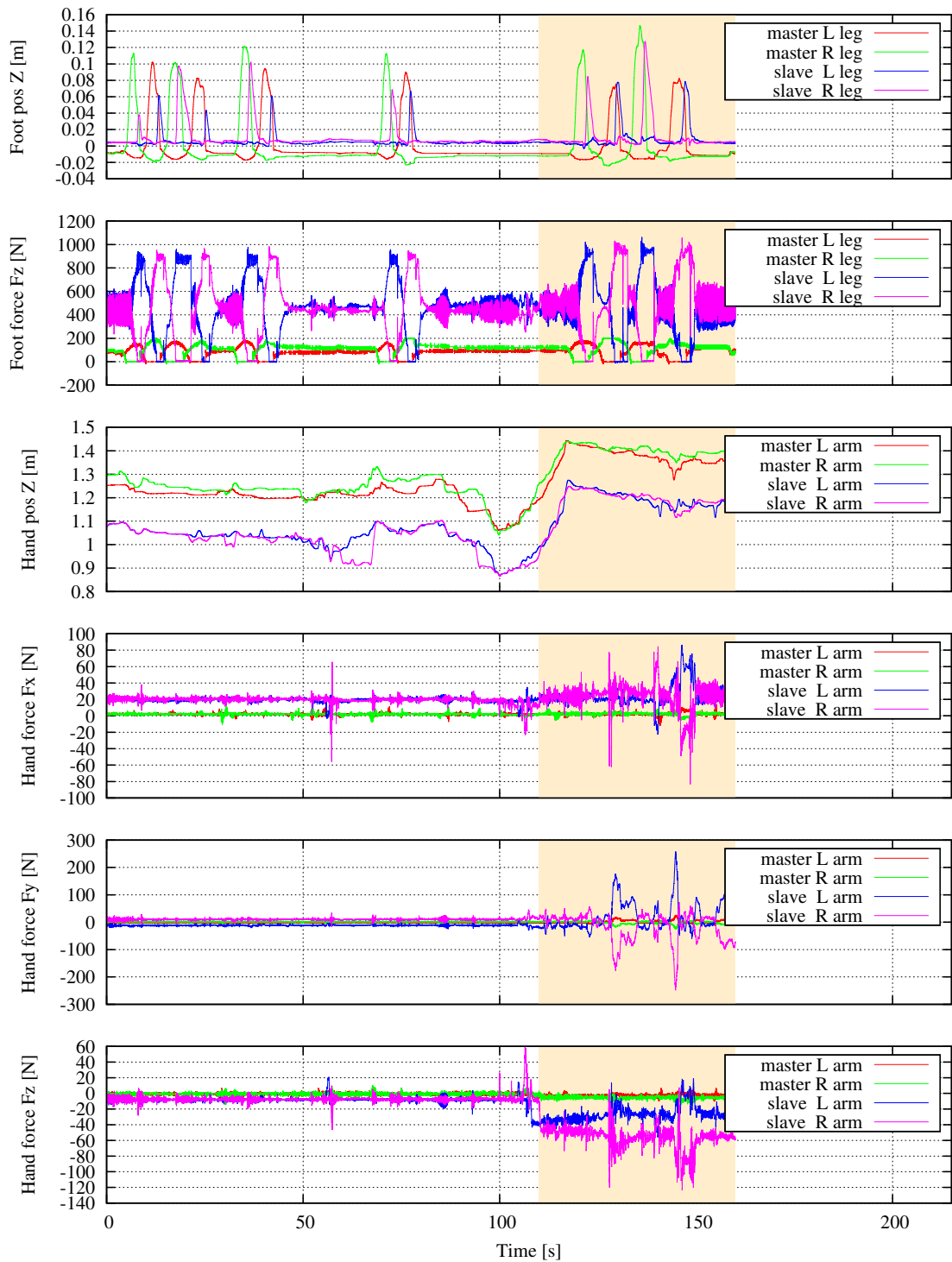


Fig 6.21: End effector pose and force plot of the heavy weight Task-Oriented bilateral dual arm manipulation with truss

第7章

結論

7.1 本研究の総括

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ていた。

第2章では、ヒューマノイドロボットの全身操縦において、複雑な運動学だけでなく、動力学に関しても実時間で制御する必要がある等の課題を挙げた。また、実用化されている自動車や航空機の操縦システムでは、複雑な動力学制御は操縦者の代わりに操縦アシストシステムが担っていることを例に挙げ、ヒューマノイドロボットの全身操縦システムにおいても同様の高度なアシストシステムを導入すべきであると主張した。また、自動車、航空機に倣い、操縦インターフェースを評価する観点として、操縦性、安定性、操舵反力特性を設定した。

第3章では、主にヒューマノイドロボットの脚運動に起因する動力学制御を担う二脚動力学アシストシステムについて述べた。このアシストシステムは操縦システムにおける安定性を向上させるものであり、重心-ZMP系を仮定した二脚ロボットにおいてDCM/CCMを指標とした重心速度制限を常に課すと同時に、遊脚の接地を半自動的に判断することで、各種計測誤差や操縦者の動作の不正確さによって操縦対象の脚ロボットが転倒することを事前に防ぐことが可能になった。

第4章では、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物理インターフェースの構成法について述べた。操舵反力特性を能動的・受動的な反力提示、操舵自由度、操舵ストロークなどに細分化し、それらの観点から、良好な操縦性と操舵反力特性を得るために搭乗型全身外骨格コックピットを提案した。その実装法として、低コスト、軽量、多機能なリンク構造体を制作するために板金加工を主に適用していることや、脚用ハプティックデバイスとしてのバックドライバビリティと大トルクを実現するために、2段歯車減速機構と強制空冷によって温度管理された高トルクモーターを採用していることを述べた。完成した全身外骨格の脚部は、一般的な卓上ハプティックデバイスに比べてバックドライブ時の抵抗力は大きいものの、脚用のハプティックデバイスとしては十分なバックドライバビリティと出力トルクを有することが示された。

第5章では、搭乗型全身外骨格コックピットを脚操縦可能な全身バイラテラル操縦用インターフェースとして運用する際に必要とされるトルク制御手法について述べた。実際のヒューマノイドロボットシステムを2つ接続したバイラテラルヒューマノイド操縦システム

においては無視できない通信遅延が生じることや、通信だけでなく機構弾性や制御の遅れなどによるモデル化困難な位相遅れ要素によって振動的な挙動が発生しやすいことを述べ、操舵反力特性を可能な限り維持したまま安定性を向上させるために、実際のシステムで観測した共振周波数に応じたゲインチューニングや、環境との接触を平面と仮定するような Task-Oriented な実装が有効であることを示した。

第6章では、これまでに述べた要素を統合したシステムを用いたヒューマノイドロボットのバイラテラル全身操縦実験について述べた。四肢を同時に操縦できる操縦性や、二脚移動も実行できる安定性、足元の障害物や段差に対応できる操舵反力特性によって、全身を同時に駆使した家事作業や、段差を含む環境での活動が可能になり、特別に安定性が求められる双腕双脚による大型重量物運搬なども Task-Oriented な制御モードによって実現性を示した。

7.2 本研究の成果

本研究の過程において得られた成果には以下のものが挙げられる。

1. リアルタイム脚操縦に特化した力学フィルター

第2章で述べた DCM/CCM による重心速度制限や、指令値/実測値の DCM,ZMP を用いた自動遊脚接地制御は、リアルタイムで入力される操縦者の重心軌道/足先軌道入力を重心-ZMP 系として Feasible な軌道に修正する力学フィルターと分類できる。予見制御や数値最適化による軌道生成手法に比べて動力的運動のパフォーマンスは劣るものの、将来情報が未知な状態で二脚バランスに関する制約条件を保証できる本手法は、操縦という背景において優位性がある。また、遊脚着地に要する遅延時間に応じた調整や、実機センサ情報を利用した足裏接地判定などの、実機運用時に有力な仕組みも取り込まれており、単純な目標軌道の生成と局所的な追従制御の組み合わせに比べて、動作の実現性が高いことも特徴である。

2. バイラテラル二脚操縦を可能にする下肢用トルク制御外骨格の実証

バイラテラル制御やハプティクス分野で従来から実用化されているトルク制御デバイスは、簡素な一段減速機構と軽量小規模なリンク機構で構成されており、下肢に適用できる高トルク・高剛性ではなかった。近年では高い減速比のハーモニックドライブとトルクセンサを組み合わせたトルク制御アクチュエータユニットが高トルクかつバックドライブを達成しているが、設計・製造コストが従来に増して高く採用しづら

かった。一方で本研究で設計・制作した搭乗型全身外骨格コックピット TABLIS の下肢は、既存技術の平歯車やプーリの2段減速構成と、強制空冷を実装した高トルク大径モータによって基本姿勢付近で片足垂直発揮力470Nを達成している。しかし、ローターイナーシャの大きい大径モータを使用していることから、摩擦抵抗や慣性抵抗によってバックドライバビリティに劣る。バックドライブ時に最も慣性抵抗を感じる方向は垂直Z方向と回転Yaw方向であり、その値は100Nと15Nmと無視できない大きさであったが、上肢に比べて力に低感度な人間の下肢に対しては本設計でも下肢用ハプティックデバイスとして機能することが確認された。

3. 操縦性，安定性，操舵反力特性に基づいたヒューマノイド操縦システムの新しい構成方針

従来のヒューマノイドロボットのバイラテラル制御の研究の潮流は、高制御周期・低遅延・高感度なカフィードバックシステムでいかに人間とロボット間の力覚や触覚を鮮明に再現するかに注力していた。しかし本研究の過程において、操縦対象が脚ロボット特有の動力学制御を含むヒューマノイドロボットの全身にまで及ぶと、そのすべてを操縦者の手動操縦に委ねることは操縦者に過度な負担を強い、現実的ではないことを示した。本研究では実用化されている航空機や自動車の操縦システムにおいて操縦性，安定性，操舵反力特性が評価軸に置かれることや、複雑な動力学制御はFly-By-Wire, Drive-By-Wireと呼ばれる操縦アシスト機能が担っていることを挙げ、実際に二脚動力学アシスト機構と搭乗型全身外骨格コックピットにより操縦性，安定性，操舵反力特性を向上させることで、これまでに不可能であった種々のヒューマノイド全身操縦動作を実現させた。この成果は、実社会でのヒューマノイド操縦の実現に向けてより包括的な方針を与えるものである。

7.3 本研究の結論

本研究ではヒューマノイドロボットによる遠隔作業の活動範囲拡大や作業効率向上を目的とした。従来のヒューマノイドロボットの全身操縦手法には、自動車や航空機の操縦システムで議論されてきた操縦性，安定性，操舵反力特性の概念が欠けていることを指摘し，安定性を向上させる二脚動力学アシストシステムの構築や，良好な操縦性と操舵反力特性を実現する搭乗型全身外骨格コックピットを導入することで，これまで実現できなかった遠隔操

縦による全身を駆使した日常作業や、段差の踏破などを可能にし、タスクに応じた制御モードの調整により更に要件の厳しいタスクへの発展性を示した。本論文で述べた操縦性、安定性、操舵反力特性に基づくヒューマノイドロボットの全身操縦システムの構築法は、ヒューマノイド操縦の技術水準の向上に貢献できるものであると結論付けられる。

7.4 今後の展望

1. 搭乗型全身外骨格コックピットの汎用物理インターフェースとしての活用

本研究で開発した搭乗型全身外骨格コックピット **TABLIS** は四肢に力フィードバックを適用できる。四肢のエンドエフェクタである手先足先以外の部分に働く力を再現することは出来ないものの、およそ人がデバイスを操作する場合は手先足先で触れて操作するため、**TABLIS** は自動車のハンドルや自転車のペダルなど任意のデバイスをエミュレートできる可能性を持っている。そのため、操縦対象が飛行ドローンのような人型でない場合にも、操縦桿とペダルの幾何拘束をエミュレートして実際の航空機の操縦席から操縦するような利用法も考えられる。

2. Augmented Reality 空間からの介入/補助

本研究のソフトウェア実装では実機のカメラ画像と実機のカセンサをフィードバックしているが、操縦者に提示する画像や力は疑似的に合成されたものでも構わない。実際に本研究でも床面は仮想的に提示されているものである。これを拡張して、立入禁止区域に疑似的な壁を発生させたり、特定の機能呼び出せる仮想ボタンを空中に出現させるなど、単なる力フィードバック操縦デバイスを超える操縦性を得られる可能性がある。

3. 動力学支配スーツとしての着用

人体を覆うような構造を持つ搭乗型全身外骨格コックピット **TABLIS** の脚部は、操縦者の両足に対して並進回転の6軸力を提示できるように設計されており、その機械剛性も **TABLIS** 単体で辛うじて自立できる程度には確保してある。そのため、単体で二足歩行が出来る可能性があるだけでなく、操縦者に **TABLIS** を装着した状態で **DCM/CCM** に基づく重心速度制限による二脚アシスト制御を適用すると、操縦者の不注意で転倒しそうになった時にも強制的に重心と足裏反力を調整して転倒回避するような、より高度で強制力の強い歩行アシストスーツとして機能する可能性がある。

謝辭

本論文は筆者が東京大学大学院 情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻 博士課程在学中に、情報システム工学研究室（JSK）において稲葉雅幸教授のご指導のもとで執筆した博士論文です。

稲葉雅幸教授には、筆者が博士課程から JSK に来て以来 4 年間、度々議論やご指導にお時間を割いて頂き、大変感謝しております。筆者の我儘な研究提案にも親身に耳を傾けて頂き、議論を重ねた上で最終的に GO サインを出して頂いた懐の深さが無ければ、この研究を続けることは出来ませんでした。搭乗型全身外骨格コックピット TABLIS は、業績も無く予算も獲得できなかった筆者の開発構想に、稲葉先生が開発予算を工面して頂いたお陰で完成させることが出来ました。用途の限られる特殊な装置に見えますが、アタッチメントの追加や制御モードによって幅広い研究に展開可能かと思いますので、少しでも研究室の今後の研究の発展に貢献できましたらと思います。また、日々忙しく各方面を巡っておられる稲葉先生が、筆者との進路相談などの折にして頂いた世間話は、筆者にとって重要な教訓になっております。

岡田慧教授には、筆者がシステム開発上の問題で行き詰まった際、幾度も問題解決に直接お手を貸して頂き、大変感謝しております。本研究で構成しているヒューマノイドロボットの制御システムの大部分は、岡田先生主導のもと開発・維持されてきた大規模ソフトウェアシステムであり、局所的なソフトウェア開発しか出来なかった筆者が Open Source Software (OSS) のような広いソフトウェア技術の世界を知るきっかけとなりました。研究初期のアイデアの議論をさせて頂いた際に、他研究との小さな差異に囚われず広い視点からあるべき姿を考えるべき、という旨の励ましを頂いたことは今でも時折思い出し励みになります。

國吉康夫教授、竹内昌治教授、山本江准教授には本論文の審査においてご多忙の中、貴重なお時間を割いていただき、多くの有意義なご指摘をいただきました。深く感謝しております。

垣内洋平特任准教授には、筆者が研究を進める上で幾度となくお力添えを頂きました。複雑なロボットシステムを運用する上で筆者が不具合に悩まされている際に、親身に問題解決に導き、時に直接お力をお借りしたこと、大変有難く感じております。また、共同研究の進行や開発予算の工面など、世間知らずな筆者でも多くのことを学ばせていただきました。

野沢峻一元特任講師には、筆者が本研究を始めた初期に、本研究から学会発表できるよう成果を出せるよう苦心していた頃、研究方針のアドバイスや論文の添削など、心強いお力添えを頂きました。

菅井文仁特任講師には、本研究の電装系にまつわる数多くの課題にお力添えを頂きました。本研究で開発した TABLIS の電装系は、菅井先生が開発・改良を進めてきた JAXON の電装系設計を踏襲したものです。電子工作や FPGA 開発の知識の無かった筆者に一から経験を積ませていただき、今でも電装トラブルの際に直接お力添えを頂いており、筆者もより一層精進するよう奮い立たせられます。

山口真奈美技術専門職員には、筆者が研究開発を進める上で、部品調達や学会出張時の手続きのトラブルに巻き込まれた際に親身に助けて頂きました。

小島邦生特任助教には、筆者の一つ上の先輩として、筆者が JSK に来て以来、非常に多くのことを教えて頂きました。研究室内の機材やソフトウェアの使い方に始まり、特に機械部品の設計や図面制作に関しては、精度・強度とコストの兼ね合い、市販品による代替や、加工限界や図面指示の仕方、組立・配線・運用や拡張性まで見越した設計など、筆者が普通に学習したのでは到底考え及ばなかったであろう深い設計技術を知ることが出来ました。複数台のヒューマノイドロボットの設計に関わり運用してきた経験のある小島さんに指導してもらえたからこそ、TABLIS は完成直後から特に大きなトラブルもなく安定稼働し続けることが出来ています。大変感謝しております。

同期の大坪愉史くん、木村航平くん、古田悠貴くんとは、筆者と別室・別研究グループでしたが、博士課程から JSK にやってきた筆者にも顔を合わせるたびに気さくに話しかけてくれ、研究の苦楽を分かち合ってくれました。

後輩の石川達矢くん、小椎尾侑多くんとはずっと同室・同研究グループで、ソフトウェアの実装などを何度も教えて頂きました。また、デモやロボットのメンテナンス等、苦楽を共にした時も長かったと思います。永松祐弥くん、真壁佑くんには TABLIS の電装に貢献して頂きました。永松くんには EtherCAT 基板やモータードライバでのトルク制御実装・デバッグ、真壁くんにはモータ周辺センサをシリアルライズする Intelligent4 基板を制作して貰いました。矢野倉伊織くんにはマシン係ということもあってか、何かとデバッグを助けてもらう機会が多かったです。板東正祐くん、グエン・キム・ゴック・カンくん、大森悠貴くん、服部未来くん、重松陸くんには同室/同ロボットユーザーということで実験の手伝いをして頂く機会が多かったと思います。

その他にも筆者と研究生活を共にして頂いた JSK の先生方、先輩方、後輩の皆も、筆者が各部屋にふらりと立ち寄った際に探し物を手伝ってくれたり、気さくに世間話をしてくれたり、世間話に留まらず研究に関わりそうな最新の情報なども教えてくれたり、JSK は普段

の生活の場としても、研究の場としても居心地の良い場所でした。

その他にも学内外問わず筆者の研究人生に関わりのあった先生方、先輩方、同期、後輩の皆には、筆者が未熟ゆえにご迷惑、ご心配をお掛けしました。

最後に、ここまで筆者の生活面を支えてくれた家族に感謝します。ありがとうございました。

2019年12月6日 石黒 康裕

発表文献

筆頭著者論文

学術論文誌

1. Yasuhiro Ishiguro, Wataru Takano, and Yoshihiko Nakamura. Bilateral remote teaching and autonomous task execution with task progress feedback. In *Advanced Robotics*, Volume 32, Number 6, 2018.

国際会議

2. Yasuhiro Ishiguro, Tatsuya Ishikawa, Kunio Kojima, Fumihito Sugai, Shunichi Nozawa, Yohei Kakiuchi, Kei Okada, Masayuki Inaba. Online Master-Slave Footstep Control for Dynamical Human-Robot Synchronization with Wearable Sole Sensor. In *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2016)*, pp. 864–869, 2016.
3. Yasuhiro Ishiguro, Kunio Kojima, Fumihito Sugai, Shunichi Nozawa, Yohei Kakiuchi, Kei Okada, Masayuki Inaba. Bipedal Oriented Whole Body Master-Slave System for Dynamic Secured Locomotion with LIP Safety Constraint. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2017)*, pp. 376–382, 2017.
4. Yasuhiro Ishiguro, Kunio Kojima, Fumihito Sugai, Shunichi Nozawa, Yohei Kakiuchi, Kei Okada, Masayuki Inaba. High Speed Whole Body Dynamic Motion Experiment with Real Time Master-Slave Humanoid Robot System. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2018)*, pp. 5835–5841, 2018.

国内学術講演会

5. 石黒康裕, 石川達矢, 野沢峻一, 垣内洋平, 岡田慧, 稲葉雅幸. 人体二脚操作に即時対応可能な等身大脚ロボットのオンラインリアルタイム操縦システム. In 第34回日本ロボット学会学術講演会, 3Y2-05, 2016.
6. 石黒康裕, 入江清, 横小路泰義, 杉原知道, 中村仁彦. 劣悪通信環境下における遠隔自動車運転操作のシステム設計. In 第33回日本ロボット学会学術講演会, 3I3-01, 2015.
7. 石黒康裕, 杉原知道. 人型ロボットの手足支持を用いたダイナミックな3次元移動. In 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 3P1-E06, 2014.

受賞

8. 2018 IEEE Robotics and Automation Society Japan Joint Chapter Young Award (ICRA2018)

共著論文

学術論文誌

9. Kunio Kojima, Yasuhiro Ishiguro, Fumihito Sugai, Shunichi Nozawa, Yohei Kakiuchi, Kei Okada, Masayuki Inaba. Rotational Sliding Motion Generation for Humanoid Robot by Force Distribution in Each Contact Face. In *IEEE Robotics and Automation Letters*, pp. 2088–2095, 2017.

国際会議

10. Yuta Kojio, Yasuhiro Ishiguro, Nguyen Kim-Ngoc-Khanh, Fumihito Sugai, Shunichi Nozawa, Yohei Kakiuchi, Kei Okada, Masayuki Inaba. Unified Balance Control for Biped Robots Including Modification of Footsteps with Angular Momentum and Falling Detection Based on Capturability. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2019)*, TuAT13.5, 2019.

国内学術講演会

11. 矢野倉伊織, 小原由羽, 石黒康裕, 室岡雅樹, 野沢峻一, 岡田慧, 稲葉雅幸. 等身大ヒューマノイドの反復的道具利用による模倣動作の獲得 -HRP2 による行動単位模倣獲得システム-. In 第 22 回ロボティクスシンポジア, 3B1, 2017.

参考文献

- [1] S. Kagami, K. Nishiwaki, J. J. Kuffner, Y. Kuniyoshi, M. Inaba, and H. Inoue. Online 3d vision, motion planning and bipedal locomotion control coupling system of humanoid robot: H7. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 2557–2562. IEEE, 2002.
- [2] S. Tachi. Real-time remote robotics-toward networked telexistence. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 18, No. 6, pp. 6–9, 1998.
- [3] 館. 相互テレイグジスタンス用人型ロボット「テレサ2」(医療・支援・介護, iメカライフ特集, ロボット). *日本機械学会誌*, Vol. 109, No. 1051, pp. 452–453, 2006.
- [4] S. Fujita, K. Baba, and D. Sudoh. Rescue robot “t-52 enryu”. In *International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Tokyo, Japan*, 2006.
- [5] Guardian GT. <https://www.sarcos.com/products/guardian-gt/>.
- [6] A. Ishii. Operation system of a double-front work machine for simultaneous operation. In *Proc. Int. Symp. Automation and Robotics in Construction*, pp. 539–542, 2006.
- [7] J. Bodner, H. Wykypiel, G. Wetscher, and T. Schmid. First experiences with the da vinci[®] operating robot in thoracic surgery. *European Journal of Cardio-thoracic surgery*, Vol. 25, No. 5, pp. 844–851, 2004.
- [8] Y. Yokokohji and T. Yoshikawa. Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling-formulation and experiment. *IEEE transactions on robotics and automation*, Vol. 10, No. 5, pp. 605–620, 1994.
- [9] K. Akahane, S. Hasegawa, Y. Koike, and M. Sato. A proposal of a high definition haptic rendering for stability and fidelity. In *16th International Conference on Artificial Reality and Telexistence-Workshops (ICAT'06)*, pp. 162–167. IEEE, 2006.
- [10] Force Dimension - products. <https://www.forcedimension.com/products>.
- [11] W. Takano and Y. Nakamura. Humanoid robot's autonomous acquisition of proto-symbols through motion segmentation. In *2006 6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 425–431. IEEE, 2006.
- [12] S. Nakaoka, A. Nakazawa, F. Kanehiro, K. Kaneko, M. Morisawa, and K. Ikeuchi. Task model of lower body motion for a biped humanoid robot to imitate human dances. In *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3157–3162, 2005.
- [13] K. Miura, M. Morisawa, F. Kanehiro, S. Kajita, K. Kaneko, and K. Yokoi. Human-like walking with toe supporting for humanoids. In *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4428–4435. IEEE, 2011.
- [14] T. Takubo, K. Nishii, K. Inoue, Y. Mae, and T. Arai. Marionette system for operating and displaying robot whole-body motion development of similar humanoid-type device. In *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)(IEEE Cat. No. 04CH37566)*, Vol. 1, pp. 509–514. IEEE, 2004.
- [15] K. Hongo, M. Yoshida, Y. Nakanishi, I. Mizuuchi, and M. Inaba. Development of bilateral wearable device “kento” for control robots using muscle actuator modules. In *RO-MAN - The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 897–902, 2009.
- [16] R. Tadakuma, Y. Asahara, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi. Development of anthropomorphic multi-dof master-slave arm for mutual telexistence. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 11, No. 6, pp. 626–636, 2005.

- [17] M. Riley, A. Ude, K. Wade, and C. G. Atkeson. Enabling real-time full-body imitation: a natural way of transferring human movement to humanoids. In *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422)*, Vol. 2, pp. 2368–2374 vol.2, 2003.
- [18] S. Calinon and A. Billard. Stochastic gesture production and recognition model for a humanoid robot. In *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)(IEEE Cat. No. 04CH37566)*, Vol. 3, pp. 2769–2774. IEEE, 2004.
- [19] Y. Ishiguro, K. Kojima, F. Sugai, S. Nozawa, Y. Kakiuchi, K. Okada, and M. Inaba. Bipedal Oriented Whole Body Master-Slave System for Dynamic Secured Locomotion with LIP Safety Constraints. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2017)*, 2017.
- [20] N. Villaroman, D. Rowe, and B. Swan. Teaching natural user interaction using openni and the microsoft kinect sensor. In *Proceedings of the 2011 conference on Information technology education*, pp. 227–232. ACM, 2011.
- [21] Z. Cao, G. Hidalgo, T. Simon, S.-E. Wei, and Y. Sheikh. Openpose: realtime multi-person 2d pose estimation using part affinity fields. *arXiv preprint arXiv:1812.08008*, 2018.
- [22] C. L. Fernando, M. Furukawa, T. Kurogi, S. Kamuro, K. sato, K. Minamizawa, and S. Tachi. Design of telesar v for transferring bodily consciousness in teleexistence. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5112–5118, 2012.
- [23] S. Tachi^o, K. Komoriya, K. Sawada, T. Nishiyama, T. Itoko, M. Kobayashi, and K. Inoue. Development of teleexistence cockpit for humanoid robot control. In *Proceedings of the 32nd ISR (International Symposium on Robotics)*, Vol. 19, p. 21, 2001.
- [24] M. Sagardia, K. Hertkorn, T. Hulin, S. Schätzle, R. Wolff, J. Hummel, J. Dodiya, and A. Gerndt. Vr-oos: The dlr’s virtual reality simulator for telerobotic on-orbit servicing with haptic feedback. In *2015 IEEE Aerospace Conference*, pp. 1–17. IEEE, 2015.
- [25] F.-J. Montecillo-Puente, M. N. Sreenivasa, and J.-P. Laumond. On real-time whole-body human to humanoid motion transfer. In *ICINCO (2)*, pp. 22–31, 2010.
- [26] J. Koenemann, F. Burget, and M. Bennewitz. Real-time imitation of human whole-body motions by humanoids. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2806–2812, 2014.
- [27] L. P. Poubel, S. Sakka, D. Čehajić, and D. Creusot. Support changes during online human motion imitation by a humanoid robot using task specification. In *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1782–1787. IEEE, 2014.
- [28] C. Favre. Fly-by-wire for commercial aircraft: the airbus experience. *International Journal of Control*, Vol. 59, No. 1, pp. 139–157, 1994.
- [29] 金井喜美雄. 航空機制御技術と自動車への適用. *計測と制御*, Vol. 45, No. 3, pp. 177–184, 2006.
- [30] N. A. Stanton and P. Marsden. From fly-by-wire to drive-by-wire: safety implications of automation in vehicles. *Safety Science*, Vol. 24, No. 1, pp. 35–49, 1996.
- [31] N. S. Argyres. The impact of information technology on coordination: Evidence from the b-2 “stealth” bomber. *Organization Science*, Vol. 10, No. 2, pp. 162–180, 1999.
- [32] 本庄季郎. 航空機設計の経験(安定と操縦性の変遷). *日本航空宇宙学会誌*, Vol. 23, No. 261, pp. 549–557, 1975.
- [33] 山本真規. 自動車の操縦性安定性の基本設計とこれに基づくシャシー制御に関する研究. PhD thesis, University of Tokyo (東京大学), 2015.

- [34] 野本謙作. 船の操縦性. 造船協会誌, Vol. 424, pp. 794–808, 1964.
- [35] 山田大介, 村岸裕治, 久代育生, 中澤正和, 小泉瑠理子, 富田健仁, 澤村浩志. ドライバが知覚する操舵反力の定量化法. 自動車技術会論文集, Vol. 47, No. 2, pp. 437–442, 2016.
- [36] D. Kim, B.-J. You, and S.-R. Oh. Whole body motion control framework for arbitrarily and simultaneously assigned upper-body tasks and walking motion. In *Modeling, Simulation and Optimization of Bipedal Walking*, pp. 87–98. Springer, 2013.
- [37] A. Wang, J. Ramos, J. Mayo, W. Ubellacker, J. Cheung, and S. Kim. The hermes humanoid system: A platform for full-body teleoperation with balance feedback. In *Humanoid Robots (Humanoids), 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on*, pp. 730–737, 2015.
- [38] Y. Ishiguro, T. Ishikawa, K. Kojima, F. Sugai, S. Nozawa, Y. Kakiuchi, K. Okada, and M. Inaba. Online Master-Slave Footstep Control for Dynamical Human-Robot Synchronization with Wearable Sole Sensor. In *Proceedings of the 2016 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2016)*, pp. 864–869, 2016.
- [39] K. Mitobe, G. Capi, and Y. Nasu. Control of walking robots based on manipulation of the zero moment point. *Robotica*, Vol. 18, No. 06, pp. 651–657, 2000.
- [40] T. Sugihara, Y. Nakamura, and H. Inoue. Real-time humanoid motion generation through zmp manipulation based on inverted pendulum control. In *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on*, Vol. 2, pp. 1404–1409. IEEE, 2002.
- [41] M. Vukobratović and J. Stepanenko. On the stability of anthropomorphic systems. *Mathematical biosciences*, Vol. 15, No. 1-2, pp. 1–37, 1972.
- [42] T. Takenaka, T. Matsumoto, and T. Yoshiike. Real time motion generation and control for biped robot - 1st report: Walking gait pattern generation-. *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1084–1091, 2009.
- [43] J. Pratt, J. Carff, S. Drakunov, and A. Goswami. Capture Point: A Step toward Humanoid Push Recovery. In *2006 6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 200–207, 2006.
- [44] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, and H. Hirukawa. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point. In *Robotics and Automation, ICRA '03*, Vol. 2, pp. 1620–1626 vol.2, 2003.
- [45] T. Sugihara. Solvability-unconcerned inverse kinematics by the levenberg–marquardt method. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 27, No. 5, pp. 984–991, 2011.
- [46] K. Yamane and Y. Nakamura. Dynamics filter - concept and implementation of online motion generator for human figures. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 19, No. 3, pp. 421–432, 2003.
- [47] 山根克, 中村仁彦. 2p2-74-094 力学フィルタによるヒューマンフィギュアのインタラクティブな動作生成. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2000, p. 105, 2000.
- [48] S. Nakaoka. Choreonoid: Extensible virtual robot environment built on an integrated gui framework. In *2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 79–85. IEEE, 2012.
- [49] N. Ando, T. Suehiro, and T. Kotoku. A software platform for component based rt-system development: Openrtm-aist. In *Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots*, Vol. 5325 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 87–98. 2008.
- [50] M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler, and A. Y. Ng. Ros: an open-source robot operating system. In *ICRA workshop on open source software*, Vol. 3, p. 5. Kobe, Japan, 2009.

- [51] Y. Kakiuchi, K. Kojima, E. Kuroiwa, S. Noda, M. Murooka, I. Kumagai, R. Ueda, F. Sugai, S. Nozawa, K. Okada, et al. Development of humanoid robot system for disaster response through team nedojsk's approach to darpa robotics challenge finals. In *2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pp. 805–810. IEEE, 2015.
- [52] fkanehiro/hrpsys-base: Basic RT components and utilities to control robots using OpenRTM. <https://github.com/fkanehiro/hrpsys-base>.
- [53] M. Borges, A. Symington, B. Coltin, T. Smith, and R. Ventura. Htc vive: Analysis and accuracy improvement. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2610–2615. IEEE, 2018.
- [54] K. Kojima, T. Karasawa, T. Kozuki, E. Kuroiwa, S. Yukizaki, S. Iwaishi, T. Ishikawa, R. Koyama, S. Noda, F. Sugai, S. Nozawa, Y. Kakiuchi, K. Okada, and M. Inaba. Development of life-sized high-power humanoid robot jaxon for real-world use. In *Humanoids*, pp. 838–843, 2015.
- [55] N. S. Pollard, J. K. Hodgins, M. J. Riley, and C. G. Atkeson. Adapting human motion for the control of a humanoid robot. In *Robotics and Automation, Proceedings. ICRA*, Vol. 2, pp. 1390–1397, 2002.
- [56] Omni by Virtuix - The leading and most popular VR motion platform. <https://www.virtuix.com/>.
- [57] H. N. T. Miyasato. A new approach for canceling turning motion in the locomotion interface, atlas. *Proc of ASME-DSC-Vol*, Vol. 67, pp. 405–406, 1999.
- [58] J. M. Hollerbach, Y. Xu, R. Christensen, S. C. Jacobsen, et al. Design specifications for the second generation sarcos treadport locomotion interface. In *Haptics Symposium, Proc. ASME Dynamic Systems and Control Division*, Vol. 69, pp. 1293–1298, 2000.
- [59] A. De Luca, R. Mattone, P. R. Giordano, and H. H. Bühlhoff. Control design and experimental evaluation of the 2d cyberwalk platform. In *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5051–5058. IEEE, 2009.
- [60] Infinadeck Move Beyond: The Infinadeck is a Onmindirectional Treadmill Designed For Native Integration With Existing VR Environments. <https://www.infinadeck.com/>.
- [61] H. Iwata, H. Yano, and F. Nakaizumi. Gait master: A versatile locomotion interface for uneven virtual terrain. In *Proceedings IEEE Virtual Reality 2001*, pp. 131–137. IEEE, 2001.
- [62] T. Hulin, K. Hertkorn, P. Kremer, S. Schätzle, J. Artigas, M. Sagardia, F. Zacharias, and C. Preusche. The dlr bimanual haptic device with optimized workspace. In *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3441–3442. IEEE, 2011.
- [63] H. Hara and Y. Sankai. Development of hal for lumbar support. In *SCIS & ISIS SCIS & ISIS 2010*, pp. 416–421. Japan Society for Fuzzy Theory and Intelligent Informatics, 2010.
- [64] B. R. Fick and J. B. Makinson. Hardiman i prototype for machine augmentation of human strength and endurance. Technical report, GENERAL ELECTRIC CO SCHENECTADY NY SPECIALTY MATERIALS HANDLING PRODUCTS ..., 1971.
- [65] A. M. Okamura, C. Richard, and M. R. Cutkosky. Feeling is believing: Using a force-feedback joystick to teach dynamic systems. *Journal of Engineering Education*, Vol. 91, No. 3, pp. 345–349, 2002.
- [66] T. Yoshiike, M. Kuroda, R. Ujino, H. Kaneko, H. Higuchi, S. Iwasaki, Y. Kanemoto, M. Asatani, and T. Koshiishi. Development of experimental legged robot for inspection and disaster response in plants. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 4869–4876. IEEE, 2017.

- [67] N. A. Radford, P. Strawser, K. Hambuchen, J. S. Mehling, W. K. Verdeyen, A. S. Donnan, J. Holley, J. Sanchez, V. Nguyen, L. Bridgwater, et al. Valkyrie: Nasa's first bipedal humanoid robot. *Journal of Field Robotics*, Vol. 32, No. 3, pp. 397–419, 2015.
- [68] F. Negrello, M. Garabini, M. G. Catalano, P. Kryczka, W. Choi, D. G. Caldwell, A. Bicchi, and N. G. Tsagarakis. Walk-man humanoid lower body design optimization for enhanced physical performance. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1817–1824. IEEE, 2016.
- [69] K. Kojima, Y. Kojio, T. Ishikawa, F. Sugai, Y. Kakiuchi, K. Okada, and M. Inaba. A robot design method for weight saving aimed at dynamic motions: Design of humanoid jaxon3-p and realization of jump motions. In *Humanoid Robots (Humanoids), 2019 IEEE-RAS 15th International Conference on*, pp. 617–624. IEEE, 2019.
- [70] T. T. Petry-Johnson, A. Kahraman, N. Anderson, and D. Chase. An experimental investigation of spur gear efficiency. *Journal of Mechanical Design*, Vol. 130, No. 6, p. 062601, 2008.
- [71] A. De Almeida and S. Greenberg. Technology assessment: energy-efficient belt transmissions. *Energy and buildings*, Vol. 22, No. 3, pp. 245–253, 1995.
- [72] Y. Asano, H. Mizoguchi, T. Kozuki, Y. Motegi, J. Urata, Y. Nakanishi, K. Okada, and M. Inaba. Achievement of twist squat by musculoskeletal humanoid with screw-home mechanism. In *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4649–4654. IEEE, 2013.
- [73] K. Hastrudi-Zaad and S. Salcudean. On the use of local force feedback for transparent teleoperation. In *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 99CH36288C)*, Vol. 3, pp. 1863–1869. IEEE, 1999.
- [74] K. Kosuge, J. Ishikawa, K. Furuta, K. Hariki, and M. Sakai. Task-oriented control of single-master multi-slave manipulator system. *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 30, No. 7, pp. 793–801, 1994.
- [75] Y. Kakiuchi, M. Kamon, N. Shimomura, S. Yukizaki, N. Takasugi, S. Nozawa, K. Okada, and M. Inaba. Development of life-sized humanoid robot platform with robustness for falling down, long time working and error occurrence. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 689–696. IEEE, 2017.

以上

1p～ 168p 完

博士論文

2019年12月6日提出

東京大学大学院 情報理工学系研究科
知能機械情報学専攻 博士課程
石黒 康裕