博　士　論　文

協働型の産業用双腕ロボットの
高度な道具の操り動作と無線モニタリング
によるその評価

2025 年 3 月

花井　宏旭

目　次

第１章　緒　論

１．１　背　景 ……1

１．２　本研究の目的 ……5

１．３　本研究の構成 ……6

参考文献

第２章　協働型ヒューマノイドロボットによるミュージカルソーのボーイング動作の考察

２．１ 緒　言…… 12

２．２　実験装置 …… 13

２．３　ミュージカルソー

２．３．１　ミュージカルソーの右手ボーイング動作と左手曲げ動作 …… 14

２．３．２　ミュージカルソーのクラドニ図形を用いた振動モードの観察 …… 17

２．３．３　有限要素解析によるミュージカルソーの振動解析 …… 17

２．４　弓演奏における発音の理論

２．４．１　自励振動の理論式…… 19

２．４．２　スティックスリップ振動発生の臨界条件…… 22

２．５　ボーイング動作の探索と結果の考察

２．５．１　ボーイング動作の軌道と弓の弦の接触余角の検討…… 23

２．５．２　サウンドフィードバックによる曲げ動作と弓速度と弓圧の探索 …… 26

２．５．３　発音の時間的な持続性も考慮した難易度…… 31

２．６　結　言 …… 32

参考文献

第３章　無線モニタリングによる協働型ロボットの超可搬に向けた電動バランサとの自律協調制御ためのモデル化

３．１ 緒　言…… 35

３．２　実験装置

３．２．１　受動型（パッシブアシスト）電動バランサ …… 35

３．２．２　ワイヤレス力・加速度・ジャイロセンサ…… 37

３．２．３　実験の様子…… 38

３．３　バランサの特性についての予備実験

３．３．１　人による受動型電動バランサの特性の学習 …… 39

３．３．２　バランサの１次遅れ要素の同定…… 41

３．３．３　バランサの操作力依存の可変粘性係数の同定…… 43
３．４　実験結果および考察
３．４．１　レーザー変位計を用いた静剛性の計測…… 45
３．４．２　ワイヤレス力・加速度センサを用いた固有振動と減衰比の計測 …… 46
３．４．３　単純なはり形状とヒンジ機構を有するモデル化による有限要素解析 … 50
３．５　結　言 …… 53
参考文献

第４章　協働型ヒューマノイドロボットによるミュージカルソーの超可搬打撃動作の考察
４．１　緒　言 …… 55
４．２　ロボット-アシスト装置系のシステム同定
４．２．１　ヒト-アシストシステムとロボット-アシストシステムの比較 …… 55
４．２．２　ロボットの位置決め制御…… 56
４．２．３　アシスト装置の摩擦のモデル化…… 58
４．２．４　ロボットとバランサ協調のモデル化…… 59
４．２．５　バランサのインピーダンスが協調動作に与える影響…… 63
４．２．６　作業速度が協調動作に与える影響…… 64
４．３　ロボット-アシスト装置系によるミュージカルソーの大変形
４．３．１　弾性力による外乱を付加したシステム…… 66
４．３．２　アシストを応用したプリロードありで，大変形したミュージカルソーの高音域の発音…… 68
４．３．３　ロボット-アシスト系の周波数応答…… 73
４．４　結　言 …… 76
参考文献

第５章　協働型双腕スカラロボットのグラスプレスハンドリング評価に向けた 4 元数を用いた無線モニタリング
５．１　緒　言 …… 78
５．２　グラスプレスハンドリング…… 79
５．３　無線モニタリングシステムによる軌道推定
５．３．１　無線モニタリングシステム…… 79
５．３．２　水平面玉転がしモデル…… 80
５．３．３　水平面玉転がしのボード線図…… 82
５．３．４　従来手法における姿勢表現の課題…… 85
５．３．５　クォータニオン（４元数）…… 86
５．３．６　クォータニオンを用いた姿勢推定…… 87

５．３．７　微小クォータニオンを導入したアルゴリズム …… 88
５．４　結果および考察
５．４．１　工作機械 2 軸同時旋回による微小クォータニオンの検証 …… 90
５．４．２　グラスプレスハンドリングにおけるボールの軌道 …… 92
５．５　結　言 …… 95
参考文献

第６章　無線モニタリング技術の卵の搬送工程への適用
６．１　緒　言 …… 97
６．２　形状模倣型ワイヤレスモニタリングシステム …… 97
６．３　洗卵検査工程への応用 …… 99
６．３．１　鶏卵型モニタリングセンサ …… 99
６．３．２　搬送行数に関する考察 …… 101
６．４　結　言 …… 103
参考文献

第７章　結　論
７．１　本研究の成果 …… 104
７．２　今後の課題 …… 106

謝　辞

第１章　緒　　論

１．１　背　　景

現在，サービス部門の生産性の低さや労働人口の減少は，世界共通の課題である．特に，超高齢化社会に突入している現在の日本の現状は深刻である．図 1-1 に日本人口の推移と将来推計 [1.1)]を示す．国の産業活力につながる生産年齢人口（15～64 歳）は，1995 年の 8700 万人をピークに，2020 年には 7400 万人となり，2065 年には 4500 万人にまで急減すると見込まれている．これに加え，製造現場の熟練技能者は高齢化により減少を続け，さらには熟練技能の次世代への伝承が上手く進んでいないのが現状 [1.2)]である．2018 年の時点で，製造業界における 35.7%の企業が「人材不足が深刻」，86.5%の企業が「技能継承に問題がある」と感じている [1.3)].

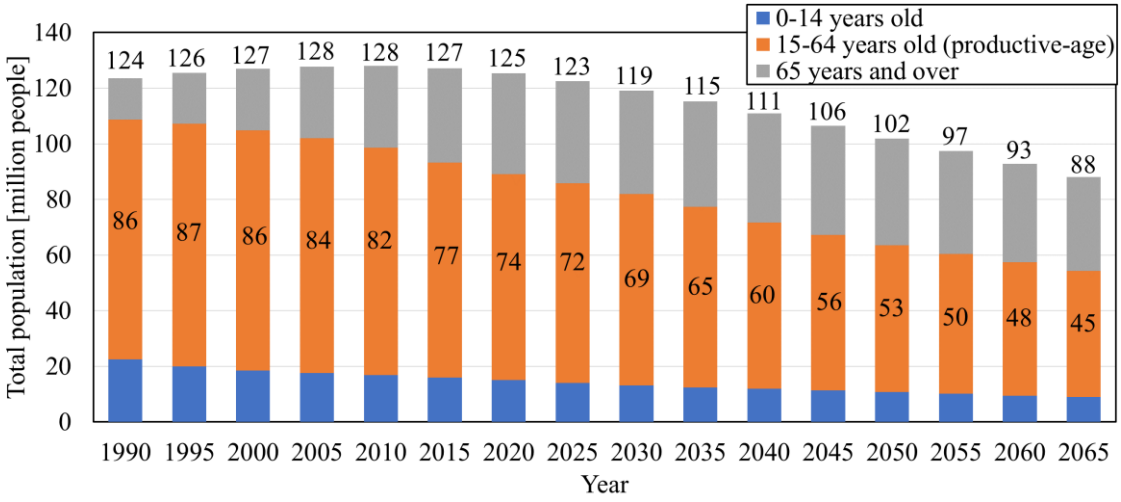


Fig. 1-1 Japanese population forecast[1.1)].

これらの解決に向け日本政府は，ロボット技術のさらなる進歩と発展を目指してロボット新戦略を掲げ，日本を世界一のロボット利用活用社会にすべく，ロボットの社会実装推進を最重要課題に定めている [1.4), 1.5)].

これまで，産業用ロボットは生産現場において生産性や品質の向上，コスト低減に大きく貢献してきた．産業用ロボットのなかでも，導入時にリスクアセスメントを実施し，産業用ロボットと接触しても大きなけがになる可能性が低く，安全柵なしでヒトと共に働くことのできるロボットは協働ロボット [1.6)]と呼ばれる．ただし，この要件を満足しない場合，各軸モータに 80 W の出力制限がかかる．近年，ヒトとロボットの共存・協働による生産ラインが期待されているなかで協

働ロボットの可能性や用途を拡大することの意義は大きい[1.7), 1.8)].

現在，多くの産業用ロボットには，ヒトが教え込んだ動作を，その通りに繰り返しおこなうよう教示するティーチング・プレイバック（教示・再生）方式が用いられ[1.9) ~ 1.11)]，それに基づきシステムを構築して専門特化型の作業を実現してきたが，この方式では事前にロボットの行動を詳細に決めなければならず，試行錯誤で莫大な時間と労力を要し，マルチタスクな作業には不向きである問題が顕在化してきている．そのため，産業用ロボットの新たな分野への適用には，リアルタイム制御による可変性のあるシステムへの移行が重要となる．

また，協働型の産業用ヒューマノイドロボットの可搬質量は片腕 2 kg であり，協働ロボットの可搬質量は大きいものでも 10 kg 前後が一般的である．現在，労働基準法で 18 歳以上の女性の場合，重量物を扱う作業は 30 kg に制限されているが，協働ロボットがヒトの重量物を扱う作業を代替するには至っておらず，協働ロボット促進における課題となっている．その解決のためには，可搬質量と位置決め精度の両立が求められる．しかし，図 1-2 に示すように，一般にロボットの可搬質量と位置決め精度にはトレードオフの関係があり，可搬質量の大きな 2 t 可搬ロボットの位置決め精度は 0.18 mm と低い（35 kg 可搬協働ロボットの位置決め精度 0.03 mm の 1/6）．

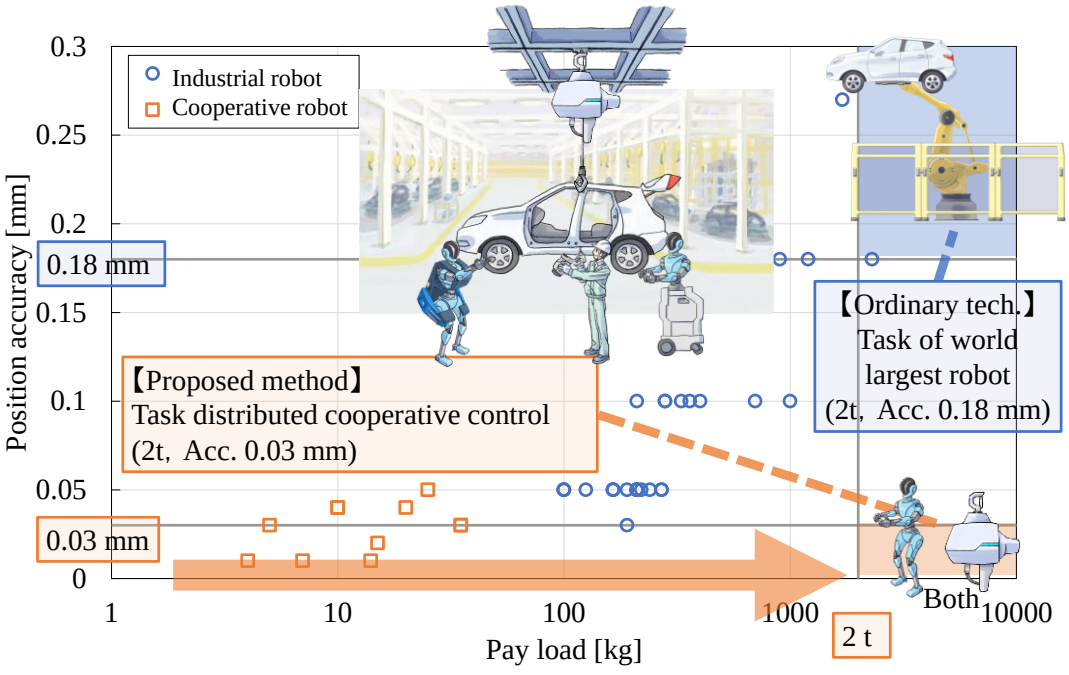


Fig. 1-2 Technology that combines ultra-portability and precision with collaborative robots (Refer to the catalog of FANUC, a major domestic robot manufacturer, 2023.5)

そこで, 図 1-3 に示す出力が十分でない協働ロボットを補完するパワーアシストシステムが必要である. ここでは, パワーアシストをヒトの作業動作の補助をおこなうための機械システムであり, 関らの文献から「ヒトが作業・動作をおこなう場合に, その能力を増大させる, あるいは状況に適応させること」とする[1.12].

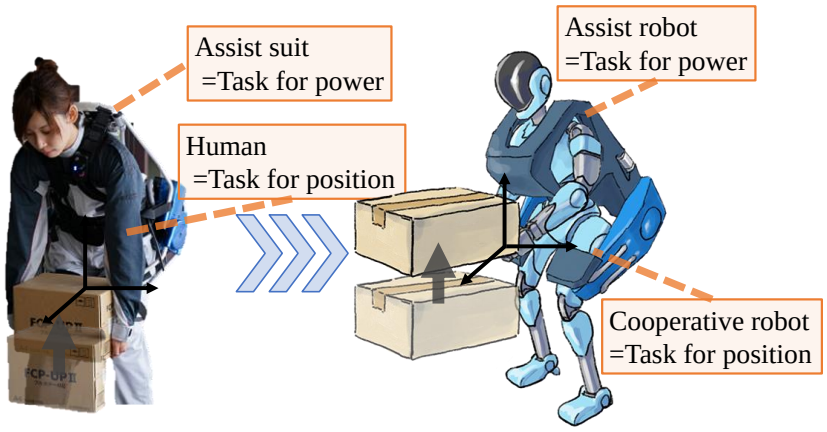


Fig. 1-3 Ultra-portable power assist for collaborative robots

近年, ヒトのパワーアシスト技術の研究・開発が盛んである. その源流は, Kazerooni によって提案された Human Extender まで遡ることができる[1.13]. 同文献では, ヒトの操作力を入力として制御される Extender を含むヒト-機械系モデルの構築, およびその制御系の安定性が議論された. 国内では, 小菅らがヒトの力の増幅率および操作性の両方を同時に調整できる制御手法の提案をおこない, さらに環境やヒトの特性がわからなくても, 機械系にあたかも道具と同一の特性をもたせるとする仮想インピーダンスの考えを導入した制御手法の提案をおこなった[1.14), 1.15]. パワーアシストの手法として力のフィードバック制御やインピーダンス制御を用いたアシスト手法の有効性が明らかにされている[1.16].

これらパワーアシストの研究の多くはヒトを補助の対象にしており, 制御系にロボットを介入させた例は少ない. 新井らは, クレーンとロボットの協調動作の研究をおこなったが, これはシステム全体を制御対象にしており個々で動作しないため応用に限界がある[1.17]. また, 松井らはバランサというアシスト装置とロボットの協調の研究をおこなったが, これもロボットの動作速度をひずみゲージで検出しバランサを制御するというシステムであり自律分散型の制御方式ではない[1.18]. また, これらの研究では, ロボットとアシスト装置のほかにも協調を実現するためのセンサ等が必要でありヒトとロボットが道具を共用できるという協働ロボットの特徴までの検討には至っていない. しかし, ロボットと

ヒトが共存する生産ラインにおいては道具の共用は重要な論点になる．

さらに，身のまわりのあらゆるモノをインターネットに接続する IoT（Internet of Things）技術の発展によって，産業界はパラダイムシフトを迎えつつある．特に製造業界における IoT は IIoT（Industrial Internet of Things）と呼ばれ [1.19]，次世代の生産システムを実現する技術として世界各国で精力的に開発・導入が進められている．ドイツは「Industrie 4.0」，中国は「中国製造 2025」といった IIoT を推し進める国策を提唱し，アメリカでは「IIC（Industrial Internet Consortium）」という世界最大級の IIoT の推進団体が設立されている [1.20) ~ 1.22)]．また，日本は現実空間と仮想空間を高度に融合させたシステム（Cyber Physical Systems）によって経済発展と社会課題の解決を両立するヒト中心の社会「Society 5.0」の実現を国策として掲げ [1.23)]，さらにより具体的なコンセプトとして，モノとモノがつながる IoT だけでなく，ヒトや技術など様々なつながりによる価値創出を目標とした「Connected Industries」を提唱している [1.24)]．これらは，様々な新技術が融合してデジタル・ソリューションを生み出す，産業発展の新たな段階を意味し，ロボットとヒトの共存・協働においても重要となる．

例えば，インダストリ 4.0 のフロントエンド・テクノロジーは，スマート・マニュファクチャリング，スマート・プロダクト，スマート・サプライチェーン，スマート・ワーキングという 4 つの主要分野を包含している．その基盤技術は，IoT，クラウドサービス，ビッグデータ，アナリティクスの 4 つの要素で構成されている [1.25), 1.26)]．この文脈において，製造分野では「デジタルツイン」という概念が提唱されている．Grieves 氏はこの定義を発展させ，デジタルツインは，物理的な製品，その製品の仮想的な表現，物理的な製品からその仮想的な表現へのデータフローと，仮想的な表現から物理的な製品への情報とプロセスの交換を可能にする双方向のデータ接続という 3 つの要素で構成されると説明している [1.27)~1.30)]．無線システムは，デジタルツインにおける情報接続を容易にするために不可欠であり [1.31), 1.32)]，いくつかの無線センサプリケーションが文献で提案されている [1.33), 1.34)]．

近年，センサ類が安価になり多数の機械設備への搭載が可能になった [1.35)] ことに加え，コンピュータ性能の飛躍的な向上，ビッグデータ解析や機械学習などの統計・情報処理技術の発達により，センサによって測定された膨大な製造現場の情報を有効に活用できるようになった．視覚ベースのモニタリングは，物体の軌跡，振動，外力をキャプチャするために広く使用されている [1.36)~1.41)] が，そのサンプリング周波数は一般的に低い．現在，一般に入手可能なカメラの最大サンプリング周波数は 30 fps 程度である．さらに，カメラには死角があるため，継続的なモニタリングが難しい．なかでも，工場における搬送工程では，搬送機器が多数のセンサを備えている監視方法がある．その場合，搬送工程が長ければ長いほ

ど，より多くのセンサが必要になる一方，どんなに多くのセンサを設置しても，効果的に監視できないポイントは必ず存在する．

そこで，対象となる現象に近接した無線センシング技術を使って現象を監視しようとする研究もあり，製造分野では Bleicher がプロセスの不安定性や不具合を早期に検知し，防止するためのセンシングツールホルダーを開発した [1.42),1.43)]．また，プロセスの振動を監視するためのワイヤレス多機能ツールホルダーシステムも開発されている [1.44),1.45)]．これらの研究は，開発コストを削減し，様々な形状に適応することで，センシングの限界を押し広げるものである．日本における IoT の市場規模は，2027 年には 1 兆円規模にまで成長すると見込まれている [1.46)]．

１．２　本研究の目的

本研究では，ヒトとロボットの共存・協働に向けた，協働型の産業用双腕ロボットの高度な道具の操り動作と無線モニタリングによるその評価を行う．そこで，ヒトの五感で感じることができる複数の物理量を取得可能なようにカメラ，マイクを標準装備し，映像情報や音情報によりリアルタイムな制御特性を 1 台のコントローラで処理する機能を具備する協働ロボット型のヒューマノイドロボットに着目した．「ヒトの環境がそのまま使える」，「ヒトの使う道具がそのまま使える」，「ヒトの形をしていることそのものに意味がある」などの特徴 [1.47)] を有し，協働ロボットの中でもヒトとより近い環境で作業することができるからである．ヒューマノイドロボットの作業を扱う研究として，産業用双腕ロボットとヒトと安全な相互作用を扱ったもの [1.48)] やドラム演奏を扱った研究 [1.49)] などがある．さらに，音を対象にした研究として楽器演奏 [1.50),1.51)] や打音検査 [1.52),1.53)] に着目した例もある．また，産業用ロボット動作の高度化の研究として釘打ちを扱ったもの [1.54)]，ロボットアームによる弾性体を利用した打撃などロボットの動作の研究もされているが，発生した音を情報として扱い，その情報を帰還して次の高度な動作を創成するサウンドフィードバックの研究は少ない．

このように，ヒューマノイドロボットの研究と産業用ロボットを別個として扱った先行研究はあるが，ヒューマノイドロボットと産業用ロボットの特性を同時に検討した研究は少ない．そこで，本研究では研究対象のロボットを産業用ヒューマノイドロボットとし，単にヒューマノイドロボットの特徴に注目するだけでなく，産業自動化に貢献しうるものを目指した．ただし，協働ロボットとしてヒトとの協働を前提としているため，ヒトの平均的なサイズのロボットとヒトが扱うことが可能な道具に対する検討とし，レイノルズ数が小さな世界であるマイクロサイズや逆に数 100 kg 以上の重量物やヒトのサイズの数倍にもなる大型ロボットを除外した範囲とした．そこで，先行研究では様々な楽器の中で

も大変形で柔軟性を有して扱いの難しい未知の道具である，ミュージカルソーの打撃音サウンドフィードバックについて検討する[1.55)]．

また，パワーアシスト装置と協働ロボットのセンサを介さない自律分散型の協調を検討する．仮想内部モデル理論をパワーアシスト装置に利用するとヒトの操作力に素早く追従するため，操作性はよいが，剛性の高い環境に接触すると位置制御系の遅れにより不安定になることが報告されている[1.56), 1.57)]．本研究でも，協働ロボットとアシスト装置の協調には不安定な挙動が現れることが予想される．そこで，本研究では協働ロボットとアシスト装置による協調のモデル化と協調に影響するパラメータについて検討する．

さらに，3D プリンタを用いてターゲットの形状を再現し，ターゲットの軌跡や振動，外力を直接モニタリングする形状模倣型無線モニタリングセンサを提案する．形状模倣型無線モニタリングセンサの形状の複雑さは，環境の複雑さと同様に調整することができる．形状模倣型無線モニタリングセンサの形状と環境の両方が単純な場合，システムは数学的にモデル化できる．このモデルに基づいて，形状模倣型無線モニタリングセンサの軌道を計算できる．一般に，姿勢表現にはジンバルロックと呼ばれる特異点がある．この問題に対処するために，微小クォータニオン法を用いることを提案する．最後に，ケーススタディとして，双腕スカラ（SCARA: Selective Compliance Assembly Robot Arm）ロボットによるボールのグラスプレスハンドリング並びに卵の洗浄工程における当該システムを用いた計測の有用性について検討する．

１．３　本研究の構成

本研究の構成は次のようになっている．

第１章は，本研究の目的と概要を述べている．

第２章では，大変形の柔軟性を有して扱いの難しい対象・道具としてミュージカルソーに着目して，リアルタイムな制御特性をもつ産業用協働ヒューマノイドロボットを用いてサウンドフィードバックによる高度なボーイング動作に対する最適な動作の探索と，双腕協調動作の実現を試みる．

第３章では，協働ロボットの超可搬動作を具現化するアシスト装置の自律分散型の制御を提案する．ヒトがアシスト装置を操るときには，その特性を学習し操り動作を実現する．しかし，一般にロボットはそのような特性を学習することなく動作する．そこで，その条件下でも安定した動作を具現化できるよう，さらに現場でも容易にその検討ができるように無線センサを導入してのモニタリングを遂行して，受動アシスト系のモデル化を検討した．

第４章では，第２章で扱った協働ロボットと第３章で扱ったアシスト装置による片腕の可搬を超える域における自律分散型の協調動作の基礎的な研究を行

い，そのモデル化を遂行する．その結果に基づき，片腕は打撃動作を遂行して他腕は超可搬動作となる極めて高度なミュージカルソーの大変形曲げ制御に基づく広範囲音域の演奏動作を試みる．

第５章では，第４章までの成果を受け，制御対象の状態を直接計測するべく，3D プリンタを用いてターゲットの形状を再現し，制御対象の軌跡や振動，外力をモニタリングする形状模倣型無線モニタリングセンサを提案する．微小クォータニオンにより特異点の問題を解決するとともに，双腕スカラロボットによるグラスプレスハンドリングを対象としてプレート上の転がり運動ボールの姿勢推定を行う．

第６章では，第５章で対象とした形状が点対称であるボールの転がり運動によるグラスプレスハンドリングを基に，形状模倣ワイヤレスモニタリングセンサの形状が点対称ではない卵型で外部環境が複雑な場合として，鶏卵の洗浄工程や検査工程に対して，第５章で構築したシステムを適用し，その発展性と工業的有用性について検討する．

第７章では，以上をまとめた本研究の結論を示している．

参考文献

1.1) 総務省，“平成 30 年度版　情報通信白書”，2018 年 7 月．

1.2) 中村肇，“製造現場の技能伝承”，精密工学会誌，Vol. 68, No. 10（2002），p. 1273-1276.

1.3) 経済産業省，厚生労働省，文部科学省，“2019 年版ものづくり白書”，2019 年 6 月 11 日

1.4) ロボット革命・産業 IoT イニシアティブ協議会，ロボット新戦略，https://www.jmfrri.gr.jp/content/files/Open/2015/20190515_RobotStrategy/20190716-032001.pdf，閲覧日 2021 年 3 月 30.

1.5) ロボットによる社会変革推進会議報告書，https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/robot_shakaihenkaku/20190724_report.html，閲覧日 2023 年 4 月 7 日．

1.6) 中央労働災害防止協会，“機能安全活用実践マニュアル ロボットシステム編”，平成 29 年度厚生労働省委託 機能安全を活用した機械設備の安全対策の推進事業.

1.7) 佐藤知正, 協働ロボット(コボット)が拓く生産と生活の革新, 横幹, Vol.9, No.2 (2015), pp.79.

1.8) 榊原伸介，工場で働くロボット-産業用ロボットの現在と未来-，日本ロボット学会誌，Vol.27, No.3 (2009), pp.263.

1.9) 浅間一，平成のロボット工学を振り返る~ロボット技術開発の動向と今

後の展望~，精密工学会誌，Vol.86, No.1 (2020), pp.23.
1.10) 川辺満徳，新井民生，ロボットコントローラの現状と動向，日本ロボット学会誌，Vol.14, No.6 (1996), pp.764.
1.11) 荻原誠，産業用ロボット，情報処理，Vol.125, No.4 (1984), pp.303.
1.12) 関弘和，堀洋一，可変インピーダンスを用いたセンサレスパワーアシストロボットの制御, 電気学会産業応用部門大会講演論文集, Vol.1 (2001), pp.601-604.
1.13) H. Kazerooni，Extender: A Case Study for Human-robot Interaction via Transfer of Power and Information Signals，Proceedings of IEEE International Workshop on Robot and HumanCmmunication，Tokyo (1993), pp.10-20.
1.14) 小菅一弘，古田勝久，横山竜昭，ロボットの仮想内部モデル追従制御系-メカニカル・インピーダンス制御への応用-, 計測自動制御学会論文集, Vol.24，No.1 (1998)，pp.55-62.
1.15) 山田陽滋，鴻巣仁司，森園哲也，梅谷陽二，自動組立工程における搭載作業のためのスキルアシストの提案, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.68, No.666 (2002)，pp.161-168.
1.16) 林原靖男，谷江和雄，荒井祐彦，パワーアシスト装置の研究(第 1 報，重力負荷と動的負荷に異なるアシスト比を設定する制御法の提案), 日本機械学会論文集(C 編)，Vol.61，No.591(1995)，pp.196-203.
1.17) 新井民夫，大隅久，クレーンとロボットの協調制御による重量物ハンドリング，精密工学会誌，Vol. 57，No. 3 (1991)，pp.467-472.
1.18) 松井雄，網谷茂，小橋章二，菊池健司，所佑文，新家達弥，組立ラインへのロボットの適用，日立評論，Vol.64，No.12 (1982)，pp.893-898.
1.19) 清水伸二，“IoT，インダストリ 4.0 時代に精密工学は何をすべきか”，精密工学会誌，Vol. 83，No.1(2017)， p. 7-12.
1.20) 総務省，“平成 29 年度版　情報通信白書”，2017 年 7 月.
1.21) 野中洋一，福本勲，山本宏，高梨千賀子，“インダストリアル IoT に関する日米独の最新動向”，研究技術計画，Vol. 33，No. 4 (2018), p.299-314
1.22) 松原厚，“工作機械の計測技術”，精密工学会誌，Vol.83，No. 3 (2017), p. 191-194
1.23) 文部科学省，“令和 3 年版科学技術・イノベーション白書”，2021 年 6 月 8 日.
1.24) 経済産業省，厚生労働省，文部科学省，“2018 年度版ものづくり白書”，2018 年 5 月 29 日.
1.25) A. G. Frank, L. S. Dalenogare, and N. F. Ayala, “Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies,” Int. J. Prod. Econ., Vol.

210, pp. 15–26, April 2019. doi: 10.1016/j.ijpe.2019.01.004.

1.26) J. Vachálek, L. Bartalský, O. Rovný, D. Šišmišová; M. Morháč, and M. Lokšík, “The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept,” 2017 21st Int. Conf. Proc. Control (PC), doi: 10.1109/PC.2017.7976223.

1.27) M. Liu, S. Fang, H. Dong, and C. Xu, “Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications,” J. Manuf. Syst., vol. 58, Part B, pp. 346–361, January 2021. doi: 10.1016/j.jmsy.2020.06.017.

1.28) D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, and B. Hicks, “Characterising the digital twin: A systematic literature review,” CIRP J. Manuf. Sci. Technol., Vol. 29, Part A, pp. 36–52, May 2020. doi: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.

1.29) M. Singh, E. Fuenmayor, E. P. Hinchy, Y. Qiao, N. Murray, and D. Devine, “Digital twin: origin to future,” Appl. Syst. Innov., 4, 36, 2021. doi: 10.3390/asi4020036.

1.30) S. Boschert and R. Rosen, “Digital twin—the simulation aspect,” Mechatron. Futures, pp. 59–74. doi: 10.1007/978-3-319-32156-1_5.

1.31) L. U. Khan, Z. Han, W. Saad, E. Hossain, M. Guizani, and C. S. Hong, “Digital twin of wireless systems: overview, taxonomy, challenges, and opportunities,” IEEE Commun. Surv. Tutor., Vol. 24, Is. 4, pp. 2230–2254, Fourthquarter 2022. doi: 10.1109/COMST.2022.3198273.

1.32) B. Sheen, J. Yang, X. Feng, and M. M. U. Chowdhury, “A digital twin for reconfigurable intelligent surface assisted wireless communication,” Netw. Internet Archit., September 2020. doi: 10.48550/arXiv.2009.00454.

1.33) D. Kandris, C. Nakas, D. Vomvas, and G. Koulouras, “Applications of wireless sensor networks: an up-to-date survey,” Appl. Syst. Innov., Vol. 3 (1), p. 14, 2020. doi: 10.3390/asi3010014.

1.34) O. I. Khalaf and B. M. Sabbar, “An overview on wireless sensor networks and finding optimal location of nodes,” Period. Eng. Nat. Sci., Vol. 7, No. 3, pp.1096–1101, June 2019. doi: 10.21533/pen.v7i3.645.

1.35) 池澤克哉，鶴畑清大臣，小田信二，林俊介，“生産業界から見たシステム技術と IoT”，計測と制御，Vol. 55，No. 4(2016)，p.295-299.

1.36) B. Shakmak, A. Al-Habaibeh, “Detection of water leakage in buried pipes using infrared technology; A comparative study of using high and low resolution infrared cameras for evaluating distant remote detection,” 2015 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT), doi: 10.1109/AEECT.2015.7360563.

1.37) Y. Horikawa, A. Mizutani, T. Noda and H. Kikuta, “Stereo Camera System with

Digital Image Correlation Method for Accurate Measurement of Position and Orientation of Positioning Stage," International Journal of Automation Technology, Vol. 9, No. 4, pp. 436 – 443, 2015, doi: 10.20965/ijat.2015.p0436.

1.38) N. Kochi, T. Tanabata, A. Hayashi and S. Isobe, "A 3D Shape-Measuring System for Assessing Strawberry Fruits," International Journal of Automation Technology, Vol. 12, No. 3, 2018, pp. 395 – 404, 2018, doi: 10.20965/ijat.2018.p0395.

1.39) N. Kochi, S. Isobe, A. Hayashi, K. Kodama and T. Tanabata, "Introduction of All-Around 3D Modeling Methods for Investigation of Plants," International Journal of Automation Technology, Vol. 15, No. 3, pp. 301 – 312, 2021, doi: 10.20965/ijat.2021.p0301.

1.40) K. Ohno, H. Date and S. Kanai, "Study on Real-Time Point Cloud Superimposition on Camera Image to Assist Environmental Three-Dimensional Laser Scanning," International Journal of Automation Technology, Vol. 15, No. 3, pp. 324 – 333, 2021, doi: 10.20965/ijat.2021.p0324.

1.41) K. Endo, T. Ishiwata and T. Yamazaki, "Development of Ultralow-Cost Machine Vision System," International Journal of Automation Technology, Vol. 11, No. 4, pp. 629 – 637, 2017, doi: 10.20965/ijat.2017.p0629.

1.42) F. Bleicher, P. Schörghofer and C. Habersohn, "In-process control with a sensory tool holder to avoid chatter," Journal of Machine Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 16 – 17, 2018, doi: 10.5604/01.3001.0012.4604.

1.43) F. Bleicher, D. Biermann, W.-G. Drossel, H.-C. Moehring and Y. Altintas, "Sensor and actuator integrated tooling systems," CIRP Annals, Vol. 72, Is. 2, pp. 673 – 696, 2023, doi: 10.1016/j.cirp.2023.05.009.

1.44) T. Yamamoto, R. Matsuda, M. Shindou, T. Hirogaki and E. Aoyama, "Monitoring of Vibrations in Free-Form Surface Processing Using Ball Nose End Mill Tools with Wireless Tool Holder Systems," International Journal of Automation Technology, Vol. 15, No. 3, pp. 335 – 342, 2021, doi: 10.20965/ijat.2021.p0335.

1.45) R. Matsuda, M. Shindou, T. Hirogaki and E. Aoyama, "Monitoring of Rotational Vibration in Tap and Endmill Processes with a Wireless Multifunctional Tool Holder System," International Journal of Automation Technology, Vol. 12, No. 6, pp. 876 – 882, 2018, doi: 10.20965/ijat.2018.p0876.

1.46) 株式会社野村総合研究所, "野村総合研究所, 2027 年度までの ICT・メディア市場の規模とトレンドを展望　～ウィズコロナの世界で DX が加速 社会問題の解決に IT はどのように貢献できるか？"2021 年 12 月 17 日.

1.47) 梶田秀司，ヒューマノイドロボット，オーム社 (2005).
1.48) Vick, A., Surdilovic, D. and Kruger, J., “Safe physical human-robot interaction with industrial dual-arm robots, ” 9th Workshop on Robot Motion and Control(RoMoCo), pp.264,269, 3-5 July 2013.
1.49) Schaal, S., Kotosaka, S. and Sternad, D., “Nonlinear dynamical systems as movement primitives,” International Conference on Computational Intelligence in Robotics and Automation. Monterey, CA, October, 1999.
1.50) Solis，J.，末藤啓，谷口公一，高西淳夫，人間形フルート演奏ロボット~人との共演や教育を行うインタラクションに関して~，バイオメカニズム学会誌，30，1 (2006) 21.
1.51) 水本武志，辻野広司，高橋徹，駒谷和範，尾形哲也，奥乃博，テルミンの高音・音量特性のモデルに基づくテルミン演奏ロボットの開発，情報処理学会論文誌，51，10 (2010) 2007.
1.52) 鈴木昭夫，吉川一三，建築・土木分野の検査ロボット(建築物の検査ロボットを中心に)，日本ロボット学会誌，4，5 (1986) 554.
1.53) 水野雅史，土田広信，本郷昭三，伊地知武吉，水野進，渡辺一憲，打音解析によるメロン果実の熟度判定，園芸学会雑誌，60，1 (1991) 83.
1.54) 辻田哲平，小水内俊介，野村勇樹，大輪拓矢，近野敦，内山勝，ヒューマノイドロボットの釘打ち動作の評価，ロボティクス・メカトロニクス講演会概要集，08-4 (2008) 1.
1.55) 廣垣俊樹，青山栄一，福家祐輔，三島明，三浦諄之，産業用ヒューマノイドロボットによる打撃音フィードバックを用いたミュージカルソーのチューイング制御の考察，日本機械学会論文集，87 (1996) 764.
1.56) 加藤寛之，池浦良淳，野口真平，水谷一樹，中村久，本田朋寛，接触抵抗を考慮した産業用パワーアシスト装置のインピーダンス制御，日本機械学会論文集(C 編)，Vol.72，No.714 (2006)，pp.214-221.
1.57) 池浦良淳，人間とロボットによる協調作業，システム制御情報学会誌，Vol.44，No.12 (2000)，pp.682-687.

第２章　協働型ヒューマノイドロボットによる

ミュージカルソーのボーイング動作の考察

２．１ 緒　　言

人とロボットの共存・協働による生産ラインが期待されているなかで協働ロボットの可能性を拡大することの意義は大きく[2.1),2.2)]，人との協働を前提としている協働ロボットが人と共通の道具を操ることが重要である．人の平均的なサイズのロボットと人が扱うことが可能な道具に対する検討が必要であり，レイノルズ数が小さな世界であるマイクロサイズや逆に数 100 kg 以上の重量物や人のサイズの数倍にもなる大型ロボットを除外した範囲を扱う．

先行研究では，様々な楽器の中でも大変形で柔軟性を有して扱いの難しい未知の道具である，西洋のこぎりを使用したミュージカルソーの打撃音サウンドフィードバックについて検討した[2.3)]．未知とはあまり解明が進んでいない道具かつ人の支持方法や日々の湿度などに起因する摩擦現象等で使用する日により特性が変化しやすい道具という定義である．解明が進んでいない道具の定義はメジャーとマイナーとするとマイナーであり，例えばピアノとかギターとかはメジャーで研究報告例も多いが，その逆で，ミュージカルソーはマイナーでその特性の研究報告例もないような，そのような対象，かつ持ち方や摩擦特性等で特性が変化しやすい道具である．そこでは対象に対してパッシブに打撃してその音情報をリアルタイムに取得し，音階およびミュージカルソーに対する打撃位置を純音性に注目してサウンドフィードバックで探索する制御を検討し，高度な演奏のための制御法を開発した．しかしながら，打撃動作以外の音に関しての検討には至っていなかった．

そこで本章[2.4),2.5)]では，ミュージカルソー演奏で打撃以外に用いられる弓による発音の動作（ボーイング動作）の高度化に注目した．ロボットによるボーイング動作としてバイオリン演奏を扱ったものがある[2.6),2.7)]．これらの研究では，バイオリンを演奏する弓側のみに着目しており，発音する弦側の特性の影響も含めた検討ではない．しかし柔軟で未知の道具であるミュージカルソーの演奏では，発音側の変形操作による音階制御と弦側のボーイング動作の弓圧およびその接触位置と速度制御が要求され，リアルタイム制御に基づくサウンドフィードバック動作が必要となるものと考えられる．すなわち弓演奏では，スティックスリップに起因する自励振動に基づく発音が必要で，弦とミュージカルソーの

変形と弦の接触位置と弓圧と速度を協調させて制御する必要がある．さらに発音だけでなく，その純音性も維持する必要がある．この高度な道具の操り動作を達成することは，ロボットがヒトと同じ道具を共用するための一つの知見になり，協働ロボットの活用の幅を拡大させる一助と考えられる．そこで本報では，産業用ヒューマノイドロボットによるサウンドフィードバックに基づく双腕の協調動作によるミュージカルソーのボーイング動作を実現させるための手法を検討した．なお，協働作業性も考慮して，リアルタイム性については，人の作業と同程度とした弓動作の動作周期に 5 s，音響解析に 3 s 程度の性能を目標とした．

２．２　実験装置

本研究では，図 2-1 に示した川田工業株式会社製の研究用ヒューマノイドロボットである「ヒューマノイドロボット Hiro」（以下「Hiro」）を使用している．頭部にはステレオカメラ及び，ステレオマイクを取り付けており，視覚・聴覚からのマルチモーダル制御を可能としている．さらに，胸部にはスピーカが内蔵されており，人間とのコミュニケーションも可能である．Hiro の各ジョイント，座標，回転方向等の定義を図 2-2 に，各リンク長を表 2-1 に示す．ここで，図 2-1 の座標 x_r，y_r，z_r，x_l，y_l，z_l はロボット手先座標（添え字 r は右手，l は左手）を表す．座標原点はともに図 2-2 における x_0，y_0，z_0 である．Hiro の制御軸数は，本体 15 DOF，ハンド部 8 DOF（片手 4 DOF）の計 23 DOF である．また制御方式は PTP 制御であり，速度は台形加減速に基づく制御が実装されている．この他，ロボットの仕様を表 2-2 に示す．表 2-2 で示したように，Hiro は協働ロボットの法規に準拠しており片手可搬質量はハンドを含め 2.0 kg と高負荷作業のために設計されていない．

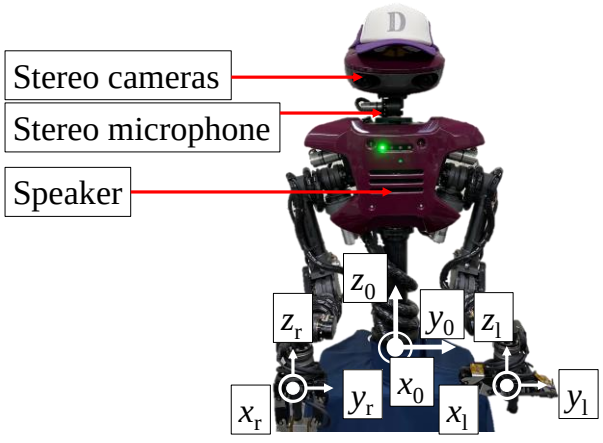


Fig. 2-1　Humanoid robot Hiro

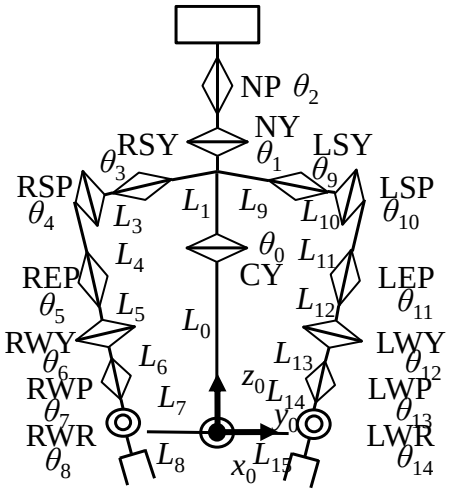


Fig. 2-2　Composition of Hiro

Table 2-1 Hiro dimensions [mm].

L_0	L_1	L_2, L_9	L_3, L_{10}	L_4, L_{11}	L_5, L_{12}	L_6, L_{13}	L_7, L_{14}
0	418	150	85	250	130	90	90

Table 2-2 Hiro specifications.

Body weight	20 kg	
One-handed mass	0.3 kg	
Maximum payload (including hand)	2.0 kg	
Repeat positioning accuracy	0.05 mm or less	
Position control method	PTP control	
Interpolation	Angle / Linear-spherical interpolation	
Speed control	Trapezoidal control	
Command Minimum Unit	Position	0.001 mm or less
	Angle	0.001 deg.

２．３　ミュージカルソー

２．３．１　ミュージカルソーの右手ボーイング動作と左手曲げ動作

大変形で扱いの難しい未知の道具としてミュージカルソーを用いた(図 2-3). のこぎり部分の厚さは 1 mm である．ミュージカルソーは西洋ののこぎりを使用した体鳴楽器である．ここで，ミュージカルソー短手方向に x_m，長手方向に y_m，x_m-y_m 平面に垂直な z_m 座標系を定義する．ミュージカルソーは，大変形で柔軟性を有して扱いの難しい未知の道具である．ここでいう，未知とは解明の進んでいない道具かつヒトの支持方法や日々の湿度などに起因する摩擦現象等で使用する日により特性が変化しやすい道具という定義である．図 2-4(a)に示すように，ミュージカルソーはのこぎりの柄を太ももでほぼ鉛直方向に挟み，のこぎりの

先端を左手で保持し，力を加えて曲げ変位量 v_l を与えながらその先端付近は S 字に屈曲させる一方，右手で端部 P_m を弓で z 方向（ミュージカルソー面の法線方向）に擦るボーイング動作で発音する楽器である．演奏者が図 2-4(b)のような S 字の曲率を調節することで楽音の音階を変化させる [2.8) ~ 2.10)]．ミュージカルソーの演奏では，演奏者は最先端下面を人差し指で支え，少し柄側の上面に親指を押し当て，先端部付近を S 字としながら柄側全体の曲率を曲げ変位量 v_m で調整し音階を変化させるが，その扱いには訓練による習熟が必要な高度な道具の操り動作の一種と考えられる．いままでは，ミュージカルソーを x_m-y_m 平面に対して水平にして，z_m = 50 mm，z_m = 200 mm くらいで発音 523 Hz，987 Hz となるが，それぞれそのためには，2.35 N，11.95 N の力が必要で，ロボットの可搬質量 2.0 kg では 1250 Hz くらいが限界である．そこで，3，4 章では，アシストによるプリロード(余荷重)を利用して，ロボットの可搬重量を超えた域での操り制御を検討する．

ロボット演奏時には，ミュージカルソーの柄を台に鉛直方向に固定し，ロボット右手でボーイング動作をおこない，左手を z_l，y_l 軸に対し動かしていくことでミュージカルソーの曲率を変化させる，双腕の協調動作を遂行する．1 点支持では，発生音の純音性が低い．そこで S 字の曲率をロボットが再現するために，ロボット手先に図 2-5 のように上面(人の親指に相当)と下面(人の人差し指に相当)に接触する二つのローラーを設置した治具を取り付け，ミュージカルソーの先端部を長手方向の 2 点で挟み込むことによって S 字カーブを再現する方法を用いた.先端の曲げ変位量 v_l は図 2-4 の親指位置で定義し，ミュージカルソーの柄側の曲率を制御して目標周波数 f_0 の発音を達成する．ここで，v_l と最先端 S 字カーブのためのロボット左手先(LWR)の x_l 周りのロボット手首の回転角 θl の組み合わせは無数に存在するので，先行研究 [2.3)]と同様に両変数に式(2-1)に示す線型的な拘束条件を設定し制御する．先行研究と同様に v_l = 200 mm，r_0 = -0.44 mm とした．r_0 は線型的な拘束条件のための変数で物理的な意味はない．v_0 は回転を考慮したミュージカルソーに与えるたわみである．

$$v_0 = v_l + r_0\theta_l \tag{2-1}$$

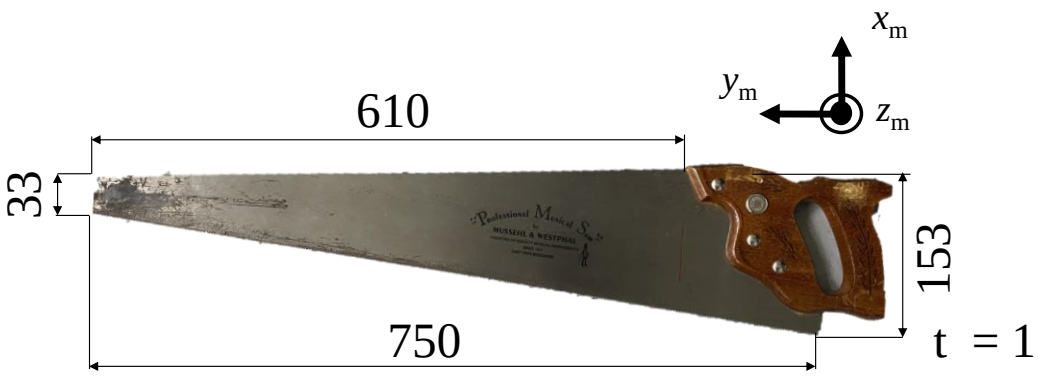
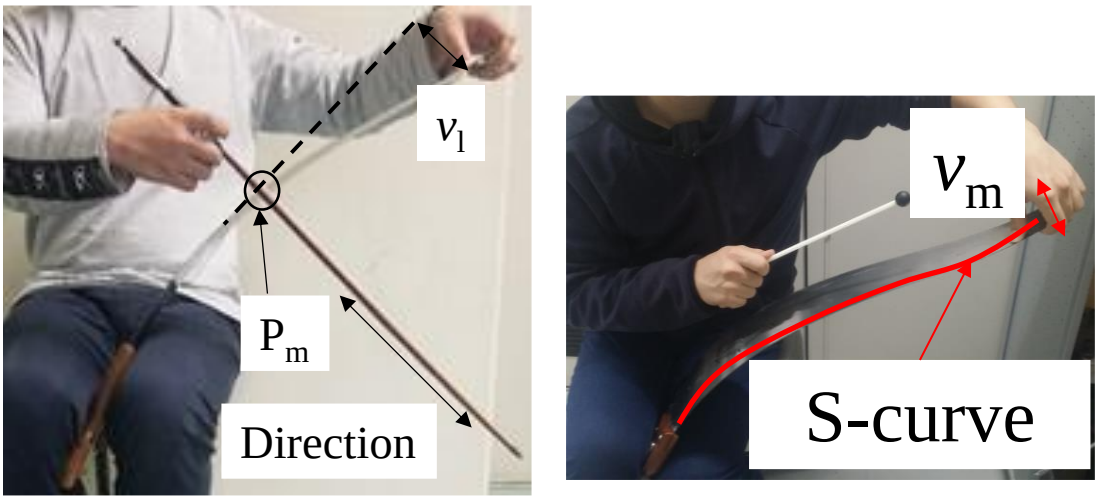


Fig. 2-3 Musical saw



(a) Conventional method (b) Musical saw's s-curve

Fig. 2-4 How to play musical saw

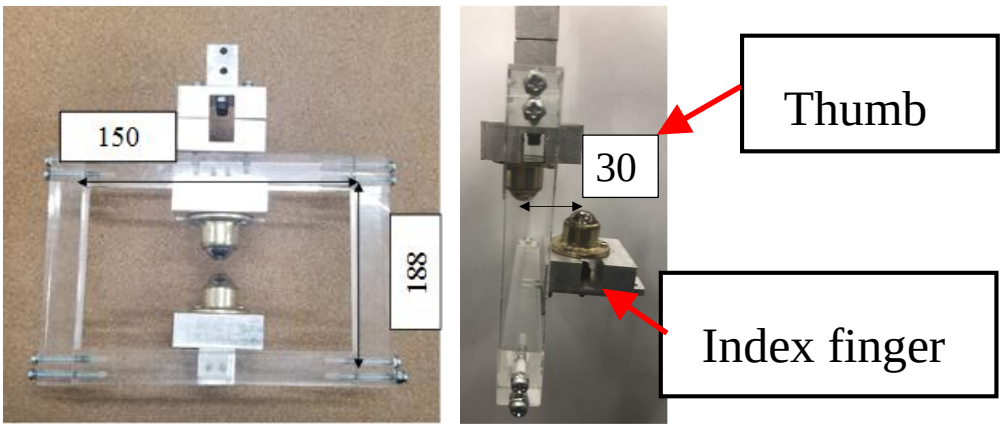


Fig. 2-5 The two point fixing jig

２．３．２　ミュージカルソーのクラドニ図形を用いた振動モードの観察

先行研究 [2.3]と同様にミュージカルソーをほぼ水平に固定して，モード形状を調べるためにその面に上に食塩粒を振り撒き,さらに図 2-5 の治具で先端に鉛直方向に変位を与えたのち，側面を弓で擦ることによって自励振動を起こした．食塩粒は振動によって移動して節に集まる原理で節の位置を可視化する．これによって現れる模様をクラドニ図形という [2.11]．ミュージカルソーを打撃した際に最も大きく現れる周波数を持つモードについて支持部に変位を与えたときのクラドニ図形を図 2-6 に示す．ここでクラドニ図形とは，加振前は一面に均一に分布していた食塩の粒が，固有モードで面外振動する腹部から振動しない節部に移動する現象により振動モードを可視化する手法である．枠線で囲った部分は振動していない節で食塩の粒子が密集して白色となり，食塩が残っていない部分である振動の腹は金属色であり，そのコントラストでモードの節と腹の分布がわかる．

図 2-6 より，ミュージカルソーには格子状のモードが現れることがわかる．一般に短形板の振動では同様に格子状のクラドニ図形が現れることが知られている.長辺方向の節の数 (振動の端は除く) が m，　短辺方向の節の数 (振動の端は除く) が n のときの振動モードを (m, n) と表すこととする．またミュージカルソーの振動はどちらの端にも決して届くことはなく，端からの減衰の起こらない閉じ込めモードを形成する [2.10]．このことを考慮すると，ミュージカルソーのモードは(2,0)と表され，先行研究 [2.3]と同様にボーイング動作による演奏でも発音における主モードとなることが判明した．

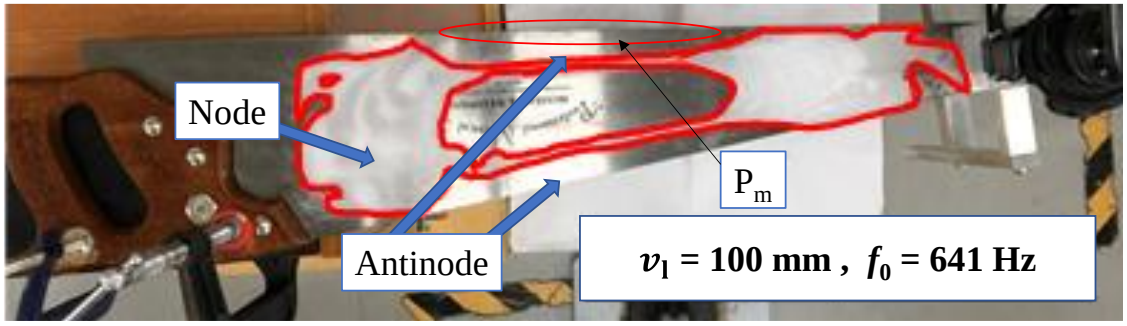


Fig. 2-6　Chladni figure in two point fixed

２．３．３　有限要素解析によるミュージカルソーの振動解析

クラドニ図形から，ボーイング動作でのミュージカルソーでの発音は主に(2,0)モードとなることが示された．ここでクラドニ図形から FEA(有限要素解析)を用いて(2,0)モードに相当するモード形状を探す．ミュージカルソーを単純な台形と近似し，図 7 に示すように固定する条件で解析をおこなう.短手方向が x 軸，

長手方向が y 軸としている. 図 2-5 の治具の接触ローラーの位置は図 2-7 中の P_1 および P_2 であり，この P_1 点に強制変位 v_l を与えている．ここでは材質は SS400 であると仮定した. 先端の両点に曲げ変位量 v_l = 100, 150, 200 mm を与えた際の (2,0)モードを図 2-8 に示す．図 2-8 より変位量の増大により，ミュージカルソーの側面に生じる振動の腹が先端へと移動して短くなり，また周波数が高くなることがわかる．ここで発音にはその腹の位置に弓の弦を接触させる必要があり，ボーイング動作のサウンディングポイントとする.

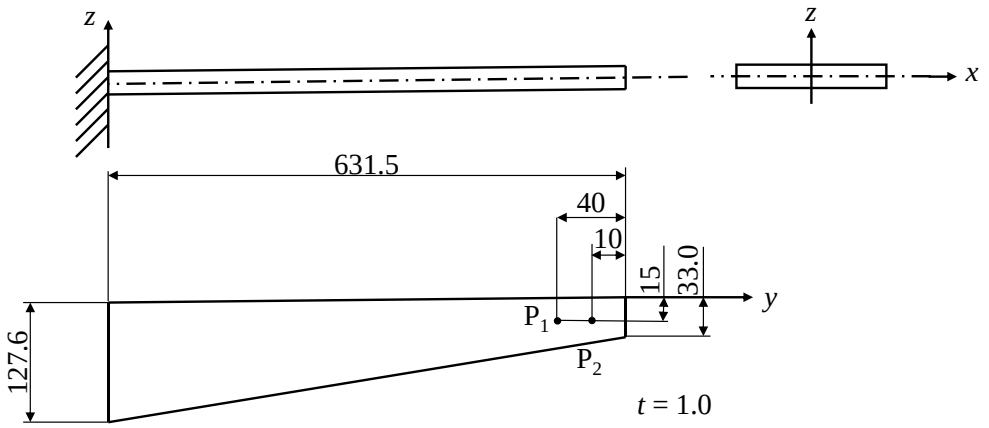


Fig. 2-7　Model of two point fixed

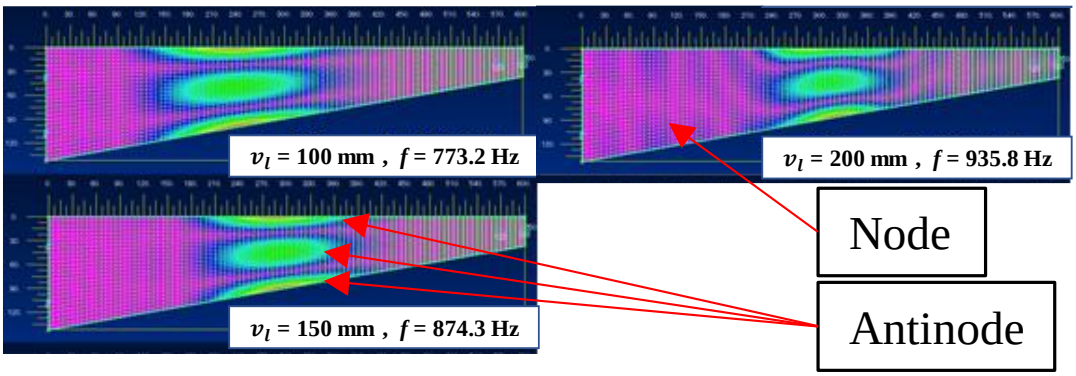


Fig. 2-8　(2,0) mode

２．４　弓演奏における発音の理論

２．４．１　自励振動の理論式

弓のボーイング動作による演奏は，弓の弦を図 2-6 にあるようなミュージカルソーの振動の腹 P_m にこすり当て，弓を図 2-7 の z 方向に接触させた状態で運動させることで発音する．すなわち接触部で生じる摩擦現象に起因し励起される自励振動に基づく現象と考えられる [2.12), 2.13)]．一般的にはスティックスリップ振動をおこしているものと考えられ，ミュージカルソーに対して弓の弦が移動するので 1 自由度系の振動でモデル化でき図 2-9 のようになる．ここで t は時間で，ミュージカルソーの等価質量 m_s，ミュージカルソーの曲げ復元力による等価バネ定数 k_s であり，粘性 c は考慮していない．

まず，物体がベルト(弓)とともに z 軸正の向きに移動するとき(スティック状態)，ベルトから物体に作用する摩擦力 f は z 軸負の向きの静摩擦力である．物体が z 軸正の向きに移動するにつれてばねの復元力が大きくなり，摩擦力が最大静止摩擦力 f_s に達すると，物体はベルト上を滑り出す(スリップ状態)．このときも物体に z 軸正の向きに動摩擦力 f_k が作用する．ただし，ここではスティックスリップ振動が生じる基本的な考え方を示すため動摩擦力 f_k を一定として考える（ただし厳密には，動摩擦係数が相対滑り速度や荷重 W の関数となるストライベック効果の影響が弓動作による発音において無視できないが，その検討は 2.5.2 項で後述する）．その後，物体がベルト上を滑って静止し，次にベルトからの摩擦力によって z 軸正の向きに加速されてベルトと同じ速度 v_z に達したところで再びスリップがスティック状態になると考えられる．物体に作用する摩擦力は振動する間常に z 軸正の向きに作用する．スティック状態では変位 z は v_z で増加する．スリップ状態では物体には動摩擦力およびばね力が作用するので運動方程式は以下の式(2-2)となる．

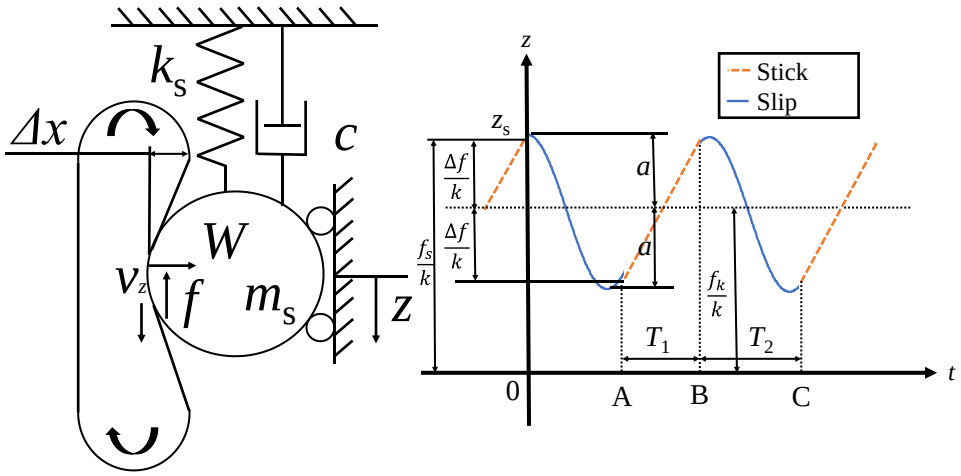


Fig. 2-9 Stick – slip vibration

$$m_{\mathrm{s}}\frac{d^2z}{dt^2}+k_{\mathrm{s}}z=\ f_{\mathrm{k}} \tag{2-2}$$

ここで，f_{k} が作用していて系が振動してない($\mathrm{d}^2z/\mathrm{d}t^2=0$)状態を考えると $z=f_{\mathrm{k}}/k_{\mathrm{s}}$ となるので，次のように新しい座標を考える．

$$y_{\mathrm{e}}=z-\frac{f_{\mathrm{k}}}{k_{\mathrm{s}}} \tag{2-3}$$

式(2-2)を変形すると，

$$m_{\mathrm{s}}\frac{d^2y_{\mathrm{e}}}{dt^2}+k_{\mathrm{s}}y_{\mathrm{e}}=0 \tag{2-4}$$

となる．この方程式の解は，

$$y_{\mathrm{e}}=a\sin(\omega_{\mathrm{n}}\,t\ +\ \varphi) \tag{2-5}$$

となる．ただし，

$$\omega_{\mathrm{n}}=\sqrt{\frac{k_{\mathrm{s}}}{m_{\mathrm{s}}}} \tag{2-6}$$

である．これは振動系の固有角振動数である．式(2-3)より

$$z=a\ \sin(\omega_{\mathrm{n}}\,t\ +\ \varphi)+\ \frac{f_{\mathrm{k}}}{k_{\mathrm{s}}} \tag{2-7}$$

となる．この式(2-7)からスリップ状態では一定の動摩擦力が z の正の向きに作用しているので，$z=f_{\mathrm{k}}/k_{\mathrm{s}}$ だけ移動した点を中心にして角振動数 ω_{n}，すなわち系の固有振動数 f_{n} で振動することがわかる．スリップ状態に切り替わる点において，ばね力は最大静止摩擦力に等しいので，その際の点を z_{s} とおくと

$$z_s = \frac{f_s}{k_s} \tag{2-8}$$

となる．この点での速度は v_z であるので，これらの条件より，式 (2-7) の a および φ は以下のように決まる．

$$a = \sqrt{\left(\frac{\Delta f}{k_s}\right)^2 + \left(\frac{v_z}{\omega_n}\right)^2}, \qquad \Delta f = f_s - f_k \tag{2-9}$$

$$\sin\varphi = \frac{\Delta f}{a k_s}, \qquad \cos\varphi = \frac{v_z}{a\omega_n} \tag{2-10}$$

点 z_s から滑り出し，はじめは少し z 正方向に初速度 v_z で動き出すが，ばね力のほうが動摩擦力 f_k より大きいので z 負方向に滑り出す．この際に働く動摩擦力は z の正方向なのでやがて物体は停止し，z の正方向の向きに作用する摩擦力によって減速され，物体の速度が v_z に達して再びスティック状態になる．式(2-9)より最大静止摩擦力と動摩擦力の差が大きいほど振幅 a が大きくなることがわかる．また，ばね定数が大きくなるほど振幅が小さくなることがわかる．さて，スティック時間を T_1(AB 区間)，スリップ時間を T_2(BC 区間)とすると，この運動の周期 T は（T_1+ T_2）となり，v_z が比較的小さくスティック時間 T_1 がスリップ時間 T_2 に比べ十分大きいとき振動数 f_s は

$$f_s \fallingdotseq \frac{1}{T_1} \tag{2-11}$$

と表される．a を一定と仮定したとき，T_1 は以下のように表される．

$$T_1 = \frac{2a}{v_z} \tag{2-12}$$

一方で v_z が増大すると次第に周期 T が短くなり，T_2 はほぼ一定値なので，T_1 と T_2 が同程度になると，振動は系の固有振動数 f_n に収束する．すなわち速度 v_z が変化すると f_s から f_n までの振動数とその高次周波数の振動が変化して生じることになる．ただし v_z が比較的小さい場合は，式(2-12)より v_z により T_1 を容易に制御することができる [2.14]．したがって，ボーイング動作の速度を制御するこ

とがスティックスリップ振動に基づく発音とその周波数の成分に重要になるものと考えられる．

２．４．２　スティックスリップ振動発生の臨界条件

スティックスリップ振動には発生限界(臨界条件)が存在することが導かれている．まず支配方程式を無次元化する．

$$\xi = \frac{c}{2(m_s k_s)^{\frac{1}{2}}} \tag{2-13}$$

また，

$$\Delta\mu = \mu_s - \mu_k \tag{2-14}$$

μ_s，μ_k はそれぞれ静止摩擦係数，動摩擦係数を表す．ここで図 2-9 における接触点の法線方向の押しつけ荷重 W すなわち弓圧は，その方向の自然位置からの変位を Δx とすると，

$$W = k\Delta x \tag{2-15}$$

となる．ここで弓の弦のその方向のばね定数を k とする．またスティックスリップ振動の臨界速度 V_{cr} は以下の式で示される．

$$V_{cr} = (1-\xi)^{2.5}(4\pi\xi m_s k_s)^{-0.5}\Delta\mu W \tag{2-16}$$

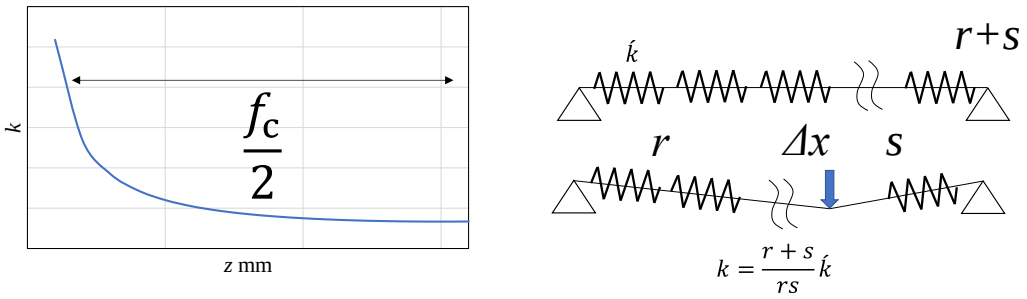
弓速度が臨界速度 V_{cr} を超えたとき，スティックスリップによる自励振動は発生しない．式(2-16)に基づきミュージカルソーでの発音について検討すると，目標の音階は固有振動数 f_n で制御するがそれは曲げ量を変化させることで対応する．弓の弦はナイロン製の太さ 0.5 mm の糸を用いており表面に松脂を塗布するが，その状態により $\Delta\mu$ が変化するものと考えられる．さらに押しつけ荷重すなわち弓圧 W は粘性 c にも影響すると考えられる．したがって非常に複雑かつ不安定な要因が多いため，ボーイング動作とその発音に基づくサウンドフィードバックにより，臨界速度 V_{cr} を超えない範囲で目標音階に適した走査速度 v_z を探索する必要があるものと考えられる．

２．５　ボーイング動作の探索と結果の考察

２．５．１　ボーイング動作の軌道と弓の弦の接触余角の検討

前章までの検討で，発音のためには弓圧，弓速度，サウンディングポイントの3点が重要と考えられる．弓圧は弓が弦から受ける反力すなわち図2-9および式(2-16)の荷重 W，弓速度は弓を動かす速度すなわち図 2-9 および式(2-12)の速度 v_z，サウンディングポイントは図 2-6 の P_m で示される弓の弦との接触点の位置の問題である．先行研究[2,3]の打撃による発音の場合は，図 2-8 に示す加振位置が重要で振動モードの腹の最大振幅付近をサウンドフィードバックで正確に探索する必要があった．しかしながら予備実験でボーイング動作での発音では，図 2-8 の腹の付近であれば大きな影響が生じないことが判明した．そこで式(2-16)にも示されているように，発音の安定性に影響が大きかった弓圧の問題に取り組む．図 2-10(b)に示すように弓の弦を整数である r+s 個の連結したばね（弦を接触点で左右に分割）と仮定すると弓のばね定数 $k(z)$は弦の中央で極小をもつ関数になる．図 2-9 で示す変位量 Δx と弓のばね定数 k には図 2-10(a)の関係を有する．そこで弓圧を一定にするためボーイング動作の目標軌道として単純な直線でなく円弧運動をしながら常に弦とミュージカルソーの振動モードの腹が接触するよう検討する．ただし，ここでは高い軌跡精度は求めていない．

ただし弦の中央から均等に設定した接触点の直線の指令距離を f_c，r_c を円弧の半径，2θ を円弧の中心角とすると，Δx の最大値は式(2-17)で定義され，弓圧 W の変化を抑える運動制御が可能となる．さらに中心角との関係を式(2-18)に示す．



(a) k　　(b) Model

Fig. 2-10 Effect of spherical interpolation

$$\Delta x = \frac{{f_c}^2}{8 r_c} \tag{2-17}$$

$$\theta = 4\frac{\Delta x}{f_c} \tag{2-18}$$

次に，動作速度すなわち弓速 v_z について検討する．図 2-4 の人の姿勢を参考にして，簡単のために図 2-11 のようにミュージカルソーを鉛直にしてロボットの左腕でその上部先端を把持し，右腕には図 2-12 に示す弓を保持して y_r 方向に 300 mm 正負方向に動かした．このときのロボット右手手先の変位量 Δx_r の最大値と実速度 v_z の関係を図 2-13 に示す．z の速度に対して x の変位が変わるのは指令速度により円弧補間の軌道生成の半径が系の応答性に起因して変化するためである．v_z の増加にともない変位量の最大値が増加していくことがわかる．すなわち θ は指令速度が大きくなるほど大きな値をとり，その大きさは本実験から 0.5 ~ 1.5 deg.程度であることがわかった．

また，サウンディングポイントにおける弓の弦の姿勢について検討する．図 2-14 のようにミュージカルソー面に対して直角な面と弦のなす z_r 軸まわりの接触余角 θ'を与えることで点接触により近づけ接触時の抵抗を減らしかつ安定した発音の制御の具現化を検討する．移動量 300 mm で弓の余角を 0.5 deg.から 2.0 deg.まで 0.5 deg.ずつ変化させた際のロボット手先の x_r 方向への最大移動量 Δx_r と発音が計測できた時間を図 2-15 に示す(弓速 v_z = 200 mm/s)．Δx_r の増加は Δx の増加と同義である．ただし発音しなかった場合は除いている．また発生音の純音性（純粋に目標とするピーク周波数音のみなのか，他のモードに起因する周波数音もノイズとして含まれるのか）についての判別も明記している．この余角 θ'をつけることで，より点接触に近い状態が具現化でき，さらに実質的な弓圧を生じるための最大変位量が増大することで，純音性が若干下がるものの，1 ストロークのボーイング動作における発音の時間を確保できる場合が多くなり，容易に音の響きを長くできることがわかった．

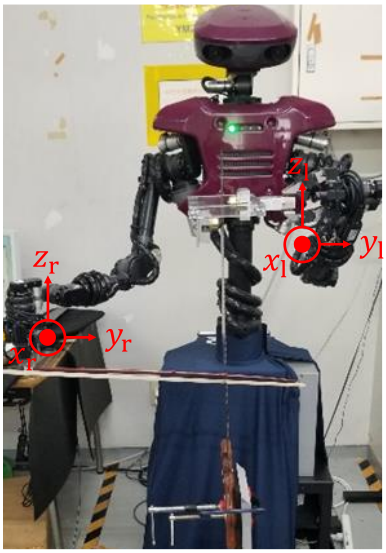


Fig. 2-11　Holding

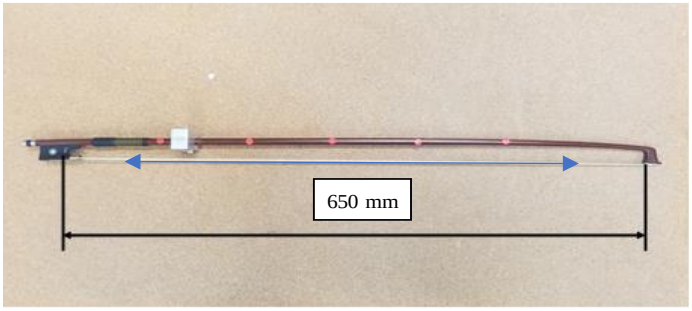


Fig. 2-12　Bow

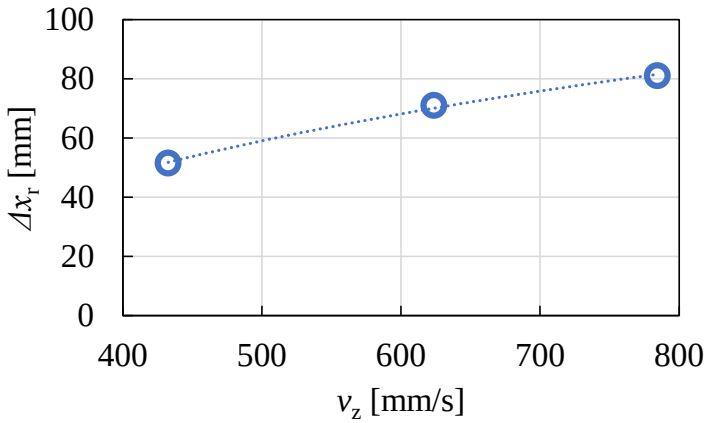


Fig. 2-13　Relationship between v_r and Δx_r

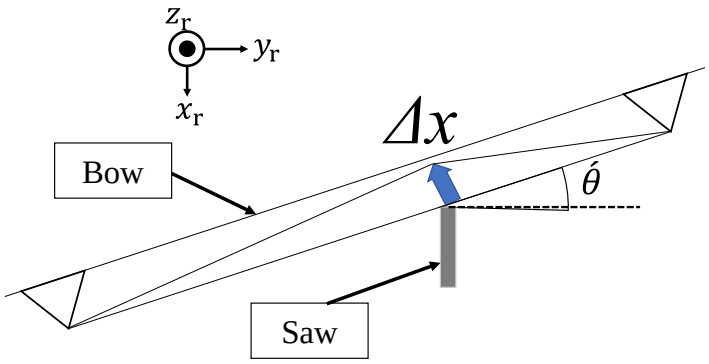


Fig. 2-14　Control with additional angle

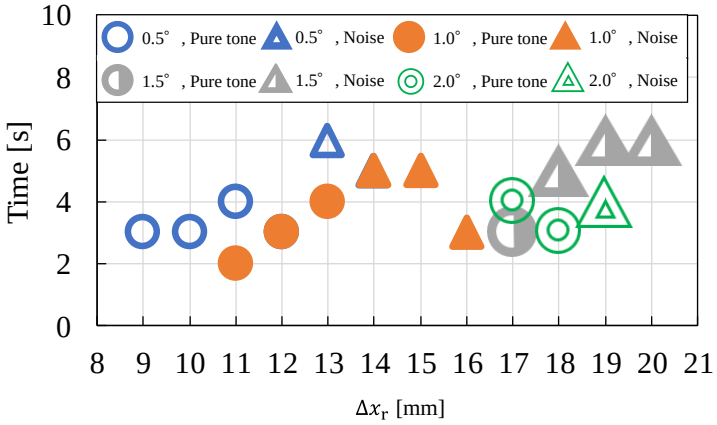


Fig. 2-15　Pronunciation time ($-y_r$)

２．５．２　サウンドフィードバックによる曲げ動作と弓速度と弓圧の探索

2.3.3 項で述べたように左手の曲げ変位量 v_l を変化させ発音の目標周波数を変更するが，その周波数毎に音質特性が大きくことなる．すなわち，図 2-16 に目標周波数 720 Hz の曲げに対して，弓速 v_z を変化させた場合の周波数分析の比較結果を示す．ここで，弓速度 v_z が 300 mm/s 程度と速い時，純音性の高い音が生じ，弓速度 v_z が 100 mm/s 程度と遅い時，高次の振動モードが励起された純音性の低い音が発生した．図 2-16 において，700 Hz 付近でピークを示しているのがミュージカルソーの主周波数である．主周波数に関しては，弓速度が速い場合も遅い場合もピークをもっている．次に，1500 Hz，2100 Hz 付近の高次周波数に注目する．高次周波数において，弓速度が遅い時，目標周波数以外にピーク値の差が 20 dB 以内の高次のノイズ成分が生じる場合があることがわかる．これは弓速 v_z の変化により，図 2-9 における周期 T（$=T_1+T_2$）だけでなく，T_1 と T_2 の比率も変化することで様々な周波数の励振がなされるためと考えられる．そこでこの曲げにおける高次の振動モードを有限要素解析した結果を図 2-17 に示す．

この解析から，目標の主周波数の振動モードに加えての高次の当該の振動モードが存在することが判明した．この振動モードを励起しないことが音の純音性を高めるために必要である．発生する主周波数を f_0，目標とする周波数を f_{nt}，f_{nt} の高次周波数を f_{nn1}(2 次)，f_{nn2}(3 次)とすると音の純音性のために以下の式を満足する必要がある．n_i は自然数である．

$$\begin{cases} n_1 f_0 = f_{nt} \\ n_2 f_0 \neq f_{nn1} \end{cases} \tag{2-19}$$

そこで，ヒューマノイドロボットの特徴のひとつである頭部のマイクによる収音に基づく音情報より，左手の曲げ動作にあわせてミュージカルソーの発音の質に注目しながら右手の動作としての弓速度と弓圧をフィードバックする手法を検討する．ここでは左手の曲げ変位量 v_l 毎に目標周波数のピーク値に対する差が 20 dB 以内となる高次ピークのノイズのない発生音を出すための v_z と Δx_r のマッピングを遂行した．2.4 節で自励振動には臨界速度が存在することを示した．その中で 2.4.1 項では動摩擦力を一定とし，スティックスリップ振動が生じる基本について議論した．しかし，厳密には式(2-16)の $\Delta\mu$ は相対滑り速度の関数(弓圧 = 荷重 W が一定であっても)となり，その発生を予想することは困難である．そこで，摩擦係数の速度特性曲線（ストライベック曲線）で考えると，速度が遅い曲線の勾配が負となる速度域で自励振動が発生しやすい．十分に速度が大きくなりその曲線の勾配が正になると振動は減衰する [2.15]．しかしその曲線は，摩擦界面のわずかな特性で変化するため臨界速度を解析的に算出することは困難である [2.16]．

そこで，ノイズのない発生音が生じた場合は，次第に速度を減少して臨界速度を探索し，ノイズのある発生音が生じた場合は，次第に速度を増大させてノイズを含まない速度を探索するアルゴリズムを検討する．まず，ノイズのある音が発生するであろう十分に低い速度から初期速度ずつ増やしていき，ノイズを発音する速度，および発音が確認できない速度を判定する（Step1）．その後それぞれ判定した速度を初期速度の 1/5 ずつ変化させ再び判定する(Step2)．そして最後に右腕を x_r 方向に変位させることで判定をおこなう(Step3)．ここで左腕の曲げ変位量は v_l = 100, 150, 200 mm とした．このとき，速度は算出した平均速度$\bar{v}$で表した．マッピングの結果を図 2-18 に示す．図 2-18(a)に探索の順を矢印で示し，その各ステップの探索結果を表 2-3 に示す．

この手法により，発音可能な弓のボーイング動作の速度範囲を探索した．この結果から，ミュージカルソーの変位量が大きくなるにつれ，速度の範囲が狭くなることがわかる．バイオリン演奏での弓速度は 60 ~ 220 mm/s である [2.17]．バイ

オリンと比較すると曲げ変位量が小さい時（図 2-18(a)）はより速い弓速度（最大で 900 mm/s 程度），曲げ変位量が大きい時（図 2-18(c)）は同程度の弓速度(50 ~ 180 mm/s の範囲)で発音できることがわかる．すなわちミュージカルソーを右手で大変形させ発音の目標周波数を設定する操作であるため，バイオリンと異なりその周波数毎に適切な弓速度の差が顕著であり，高度な扱いが必要な道具であることも判明した．このマッピングを従来のティーチング・プレイバック方式で具現化するためにはマイクといった解析装置などが別途に必要であり，さらに高度な人材と時間と手間を要する．また，摩擦による自励振動に基づく発音であるため，動作日が異なれば再教示も必要で運用は極めて困難になるものと推察される．隣で工作機械が稼働している程度の騒音化，図 2-16 でいう各周波数の音圧スペクトル-60 dB 程度が維持されている制約条件における本システムの双腕の協調とサウンドフィードバック制御で，2.2 節で示したヒューマノイドロボットの頭部マイク(図 2-1)，2.3.1 項で示した治具(図 2-5)，2.5.1 項で示した弓(図 2-12)を用い，稼働初期に自動マッピングすることで，楽曲演奏のような複雑な目標動作でも安定して運用が可能となるものと考えられる．ここで，図 2-18 における 1 つのプロットを生成するのにマイクでの判定(2 s)と弓動作(3 s)で 5 s ほどの時間を要す．そのため，1 つの曲げ量に対してこの繰返しをおこなうため，100 s ほどの時間が必要である．よって，人が現場で操る高度な道具であるが，それを協働ロボットが共用することも可能となるものと考えられる．

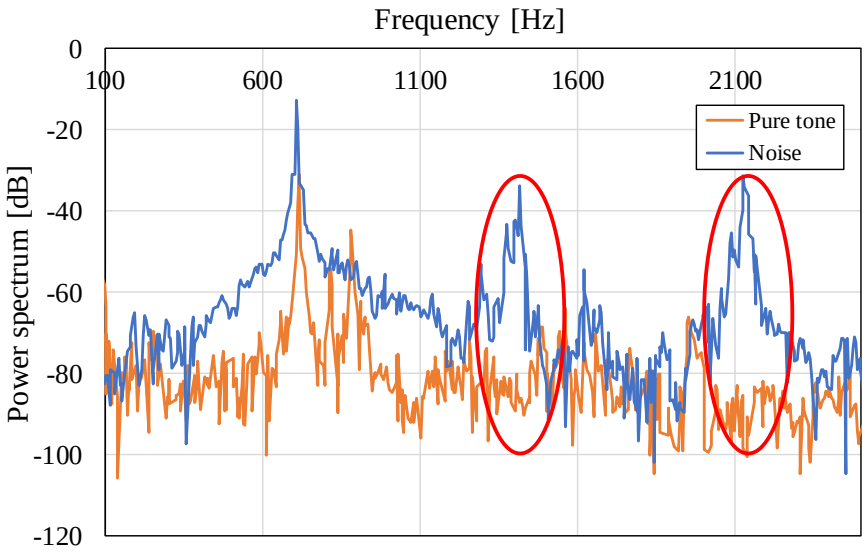


Fig. 2-16　Relationship between power spectrum and frequency

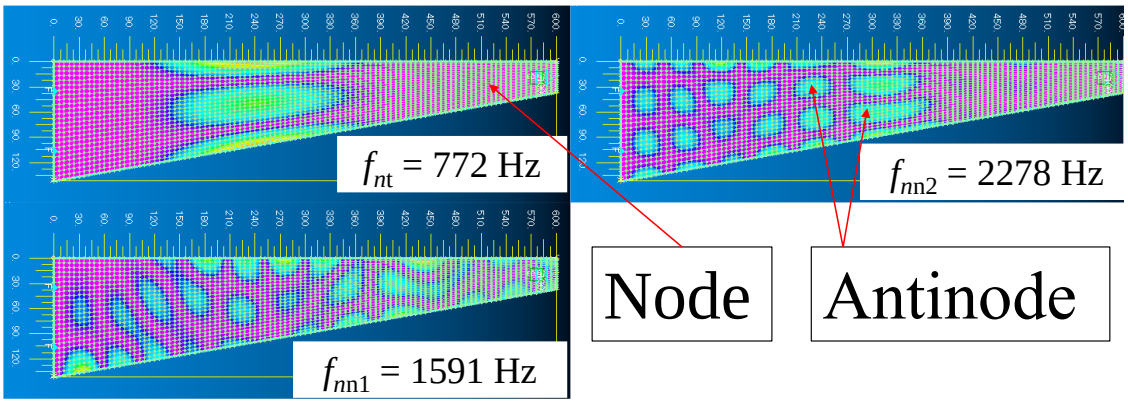
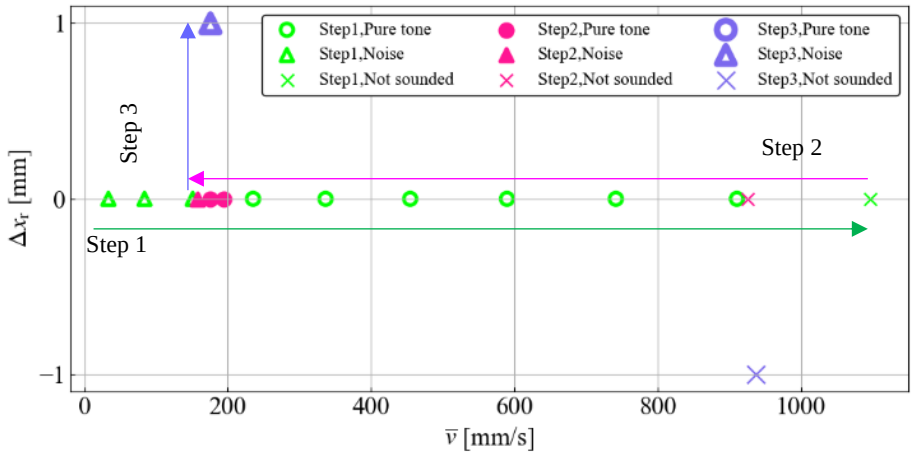
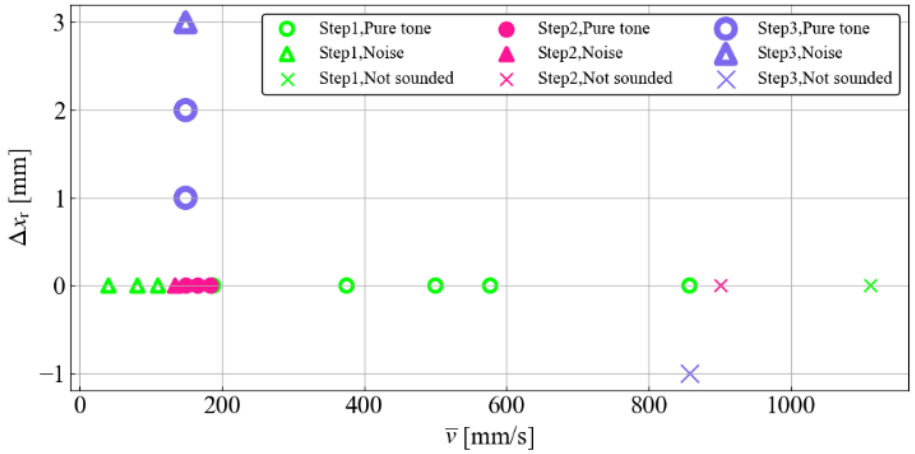


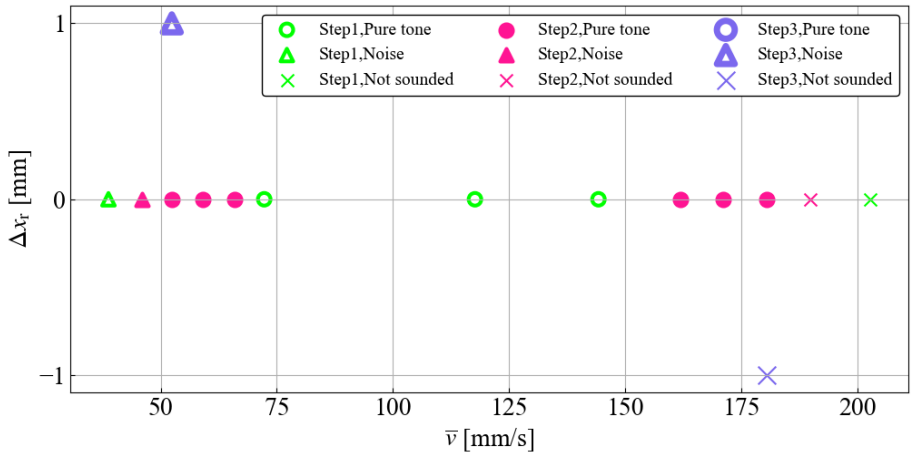
Fig. 2-17 Higher frequency mode



(a) v_l = 100 mm



(b) v_l = 150 mm



(c) v_l = 200 mm

Fig. 2-18 Searching process in bow control range

２．５．３　発音の時間的な持続性も考慮した難易度

2.5.2 項のマッピングにより純音性が確保可能な弓速度の範囲が明確化できた．その範囲の中でさらに最適な弓速度を決定するため，発音の時間的な持続性に着目する．2.5.1 項の結果より自励振動による発音は不安定な要因を含んでおり，弓速度 v_z を増大すると安定する一方で，1 ストロークのボーイング動作での発音時間が短くなるボーイング動作特有の特性がある．そこで，1 ストロークのボーイング動作での発生音の時間長さ t_s [s]，発音が可能な弓速度 v_s [mm/s]に対して，t_s と v_s の積の発音持続性を目的関数 d [mm]とし，これを最大化する適切な弓速度の目安と考えられる．そこで求めた目的関数 d の最大値と曲げ変位量 v_l の関係を図 2-19 に示す．　曲げ変位量 v_l に対して d に極大が存在することがわかる．曲げ変位量 v_l は発音の目標周波数を制御しているため，発音の難易度が周波数により異なることを示している．この場合は曲げ変形量 v_l = 150 mm 付近に発音持続性の最適値が存在し，すなわち 700 Hz 付近の周波数において発音が容易となる特性を有することがわかる．すなわち道具としての性能が発揮しやすい音域があり，音名 F5（ファ 698.5 Hz）付近を中心にその範囲を有することがわかり，本システムで未知の道具の特性とその操り動作の目安を探索できたものと考えられる．

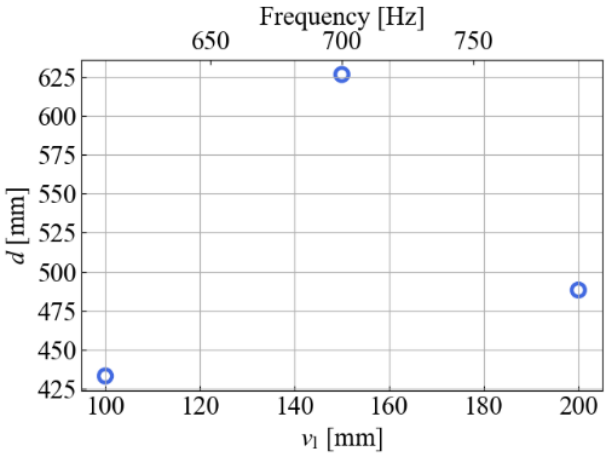


Fig. 2-19　Multi-purpose optimization

Table 2-3　Searched range on Fig.2-18 (a)

	Initial point($\bar{v}, \Delta x_r$)	End point($\bar{v}, \Delta x_r$)
Step1	(44, 0)	(1034, 0)
Step2 Noise	(194, 0)	(158, 0)
Step2 Not sounded	(1034, 0)	(926, 0)
Step3 Noise	(180, 0)	(180, 1)
Step3 Not sounded	(937, 0)	(937, -1)

以上より，弓速度の決定の際には，ヒューマノイドロボットのマイクで収音して質（目標周波数と高次ノイズ）と発音時間の持続性の両面から，右手のボーイング動作と左手の曲げ変形の動作の組み合わせを検討できた．発音持続性の最適値を超える発音の難易度が高い大きな曲げ変形量の弓速度を 2.5.2 項の手法で探索して，次に最適値以下の発音が比較的容易な小さな曲げ変形量の弓速度を同様にして求める．それらの結果をルックアップテーブル（本報の場合，同様の探索で D#5 の 622.254 Hz から G#5 の 830.609 Hz まで発音が可能であった）として学習することで，ミュージカルソーのような大変形で柔軟性ある未知の道具の発音性についても，緒言で目標とした性能を満足するリアルタイム制御で可変性あるシステムが構築できる可能性を検証することができた．

２．６　結　　言

本章では，大変形の柔軟性を有して扱いの難しい対象・道具としてミュージカルソーに着目して，リアルタイムな制御特性をもつ産業用協働ヒューマノイドロボットを用いてサウンドフィードバックによる最適な動作の探索と，双腕協調動作の実現を試みた．その結果，サウンドフィードバックにより，弓演奏に適した弓圧，弓速度の決定が可能であり，弓演奏という困難なタスクにおいて可変性のあるシステムを構築し人と道具を共用できる可能性を示すことができた．その結果を以下にまとめる．

(1) ミュージカルソーを弓で弾く動作をスティックスリップによる自励振動を用いてモデル化した．この検証で，弓速度が発音とその周波数の成分に重要であることがわかった．さらに，臨界速度を超えない範囲で目標音階に適した弓の走査速度を探索する必要があることがわかった．

(2) スティックスリップによる自励振動モデルをもとに，ボーイング動作に適したロボット動作を考察した．そこで，音の響きを残し，弓の反力を一定にしやすいという点で円弧補間による動作が適していることがわかった．

(3) サウンドフィードバックによって発音可能な弓のボーイング動作の速度範囲の探索をおこなった．その結果，ミュージカルソーを大変形させ発音の目標周波数を設定するため，バイオリンとは異なり周波数毎に適切な弓速度の差が顕著であり，高度な扱いが必要な道具であることが判明した．

(4) サウンドフィードバックで得られた音情報からのルックアップテーブルによる学習により，大変形で柔軟性のある未知の道具の発音性について，リアルタイム制御で可変性のあるシステム構築の可能性を検証できた．

参考文献

2.1) 佐藤知正，協働ロボット(コボット)が拓く生産と生活の革新，横幹，9，2 (2015) 79.

2.2) 榊原伸介，工場で働くロボット-産業用ロボットの現在と未来-，日本ロボット学会誌，Vol.27，No.3 (2009), p.263.

2.3) 廣垣俊樹，青山栄一，福家祐輔，三島明，三浦諄之，産業用ヒューマノイドロボットによる打撃音フィードバックを用いたミュージカルソーのチューイング制御の考察，日本機械学会論文集，87 (1996) 764.

2.4) Hiroaki Hanai, Akira Mishima, Atsuyuki Miura, Toshiki Hirogaki, Eiichi Aoyama, Realization of Skillful Musical Saw Bowing by Industrial Collaborative Humanoid Robot, Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, Vol.7, No.5 (2022), pp.1-9.

2.5) 花井宏旭，三浦諄之，三島明，廣垣俊樹，青山栄一，産業用協働型ヒューマノイドロボットによるミュージカルソーのボーイング動作の検討，精密工学会誌，Vol. 88, No. 10 (2022), pp. 773-780.

2.6) 藪博之進，荒谷貴夫，渋谷恒司，バイオリン演奏ロボットの演奏動作生成アルゴリズム：弓の進行方向とボーイングパラメータの決定(アミューズメント・エンタテイナーロボット)，ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集，14-2 (2014) 1.

2.7) 許翔宇，青村茂，安藤啓太，中楯浩康，ヴァイオリン演奏ロボットにおける運弓動作の確立に関する研究，精密工学会学術講演会講演論文集， (2015) 917.

2.8) 金子淳一，細谷直基，古屋耕平，ミュージカルソーの発音メカニズムに基づく薄板構造物の低振動・低騒音設計，Dynamics & Design Conference 2010, 111 (2010) 1.

2.9) Lenard, J., Graebner, J., 1989, Scratch My Back: A pictoral history of the musical saw and how to play it, Seada records, California.

2.10) Fletcher, N. H., Rossing,T. D., Kishi, K., Kubota, H., Yoshikawa, S.，楽器の物理学，丸善出版株式会社，6 (2012) 79.

2.11) 奥井公太郎，角田陽，舘野寿丈，異物検査のための振動を利用した粉体の操作，精密工学会学術講演会講演論文集，6 (2012) 697.

2.12) 野村昭一郎，武者利光，内藤善之，森泉豊栄，振動・波動入門，コロナ社，(1991) 79.

2.13) 中野健，スティックスリップ回避のための設計指針，日本ゴム協会誌，80，4 (2007) 134.

2.14) 加藤仁，松林恒雄，工作機械案内面のしゅう動特性について(第 1 報，ス

ティックスリップ現象における静摩擦特性), 日本機械学会論文集(第 3 部), 35, 273 (1964) 1138.
2.15) 横井雅之, 摩擦音の発生機構について, 大阪産業大学産業研究所所報, 5 (1982) 72.
2.16) 高野英資, 川口英伸, 張祥永, 佐伯暢人, 強制摩擦振動 : 第 1 報, 直線と双曲線の合成摩擦力速度特性における平均法の解と安定性, 日本機械学会論文集 C 編, 67, 658 (2001) 1697.
2.17) 渋谷恒司, 菅野重樹, 加藤一郎, バイオリン右腕ボーイング動作におけるスキルの分析, 人間工学, 30, 6 (1994) 395.

第３章　無線モニタリングによる協働型ロボットの超可搬に向けた電動バランサとの自律協調制御ためのモデル化

３．１ 緒　　言

前章にて，産業用協働ヒューマノイドロボットによるミュージカルソーのボーイングサウンドフィードバックについて検討した．しかし，人と協働できる安全性の確保のため関節モータ出力が小さくなり，一般に協働ロボットの可搬質量は小さく現在市販されている最大のもので 30 kg 程度[3.1), 3.2)]であり，ミュージカルソーを用いて所望の音階を再現するために必要な大変形を与えるには出力が十分でない．これは，重量物を扱う作業の遂行に至っていないことも示唆しており，人との協働を加速する課題となっている．

そこで本章[3.3)]では，協働ロボットと電動リフタ装置によるパッシブアシスト協調を提案[3.4)]し，パワーアシスト機構との自律協調制御について検討する．ここでいう，パッシブとは，操作者の力入力に対して受動的にアシストを遂行することをいう．人の動作の対象としては，自動車のパワーステアリング[3.5), 3.6)]，電動アシスト自転車[3.7) ~ 3.9)]などで実用化されてきている．しかしながら，これらのアシストは人が機械のアシスト特性を感じて学習しながら習熟するため不安定な現象が生じないのが一般的である．一方，ロボットと電動リフタの自律協調制御では，それぞれが位置制御および力制御を遂行しており，その競合により振動現象などを生じることが判明している．そこでこの協調をモデル化するにあたり，協働ロボットの外部環境からの力の入力に対する制御システムを同定することが重要になる．また，協働ロボットの静剛性と動剛性を協働ロボットの作業現場でも容易にモデル同定が可能なように無線での計測を行うとともに，ヒンジ機構を取り入れたモデルにより，有限要素解析をおこない，モデルの有効性を確認した．

３．２　実験装置

３．２．１　受動型（パッシブアシスト）電動バランサ

図 3-1 に示すユニパルス株式会社製の電動バランサ「Moon Lifter」を使用した．z_a はバランサの鉛直方向に対する座標系である．以下，バランサと呼称する．バランサは吊るした重量を内蔵された力センサで検出し，その重量をサーボモータが負担することでヒトの鉛直方向に対する搬送作業をアシストする装置である．ヒトとの協調作業を実現するため，バランサにはインピーダンス制御が施され，仮想的な等価質量 m_a，速度粘性係数 D_0，最大静止摩擦力 f_s，動摩擦力 f_d （f_s

$= f_d$）を設定し操作性を変えることができる．ただし，本研究では，等価質量 m_a を 15.1 kg に固定して粘性係数と摩擦力に注目して議論する. また, 後述するが, 速度粘性係数は動作中に一定でなく操作力に依存した可変粘性である. 表 3-1 にバランサの主な仕様をまとめる.



Fig. 3-1 Balancer.

Table 3-1 Balancer specifications.

Dimensions	314 × 179 × 176 mm
Maximum load	30 kg
Equivalent mass m_a	15.1 kg
Velocity viscosity coefficient D_0	0 ~ 10 kg/s
Maximum static / Dynamic Friction f_s / f_d	0 ~ N
Maximum winding speed	500 mm/s

３．２．２　ワイヤレス力・加速度・ジャイロセンサ

力と 3 軸方向の加速度，角速度の計測を同時にすることができる PASCO 株式会社製のワイヤレス力・加速度・ジャイロセンサ（PS-3202）を使用した（図 3-2）．表 3-2 にセンサの仕様を示す．力センサは，圧縮荷重を正，引張り荷重を負として検出する．

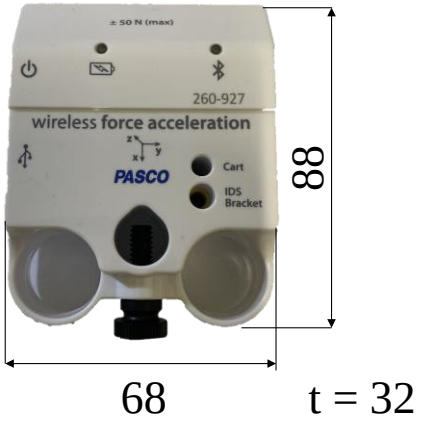


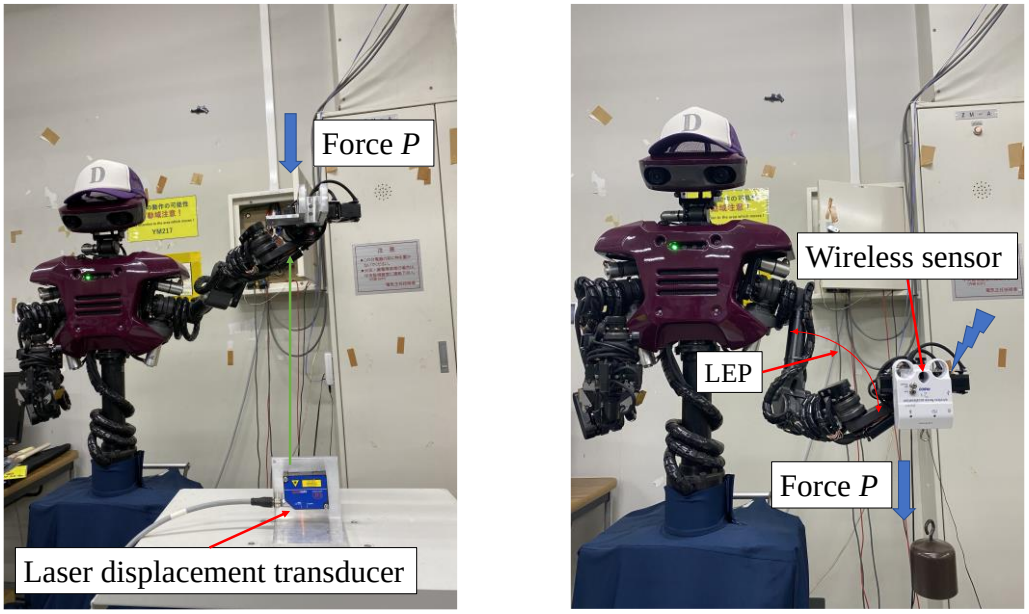
Fig. 3-2 Wireless force acceleration sensor.

Table 3-2 Sensor specifications.

Measurement range	Force	±50 N
	Acceleration	±16 g (g = 9.8 m/s^2)
Practical measurement accuracy	±1 %	
Resolution	Force	0.03 N
	Acceleration	0.2 m/s^2
	Angular velocity	3 deg./s
Sampling rate	200 Hz	

３．２．３　実験の様子

SENTEC 株式会社製のレーザー変位計 ILD1402-400 レーザー変位計，ワイヤレス力・加速度・ジャイロセンサを用いた計測の様子を図 3-3 に示す.



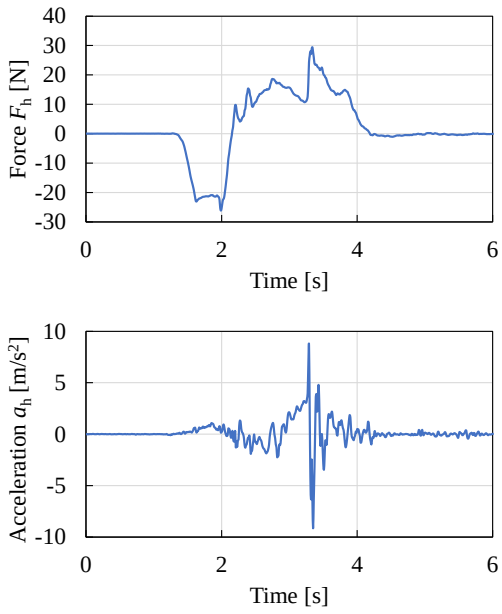
(a) Laser displacement transducer　　(b) Wireless sensor

Fig. 3-3 Non-contact and wireless measurement.

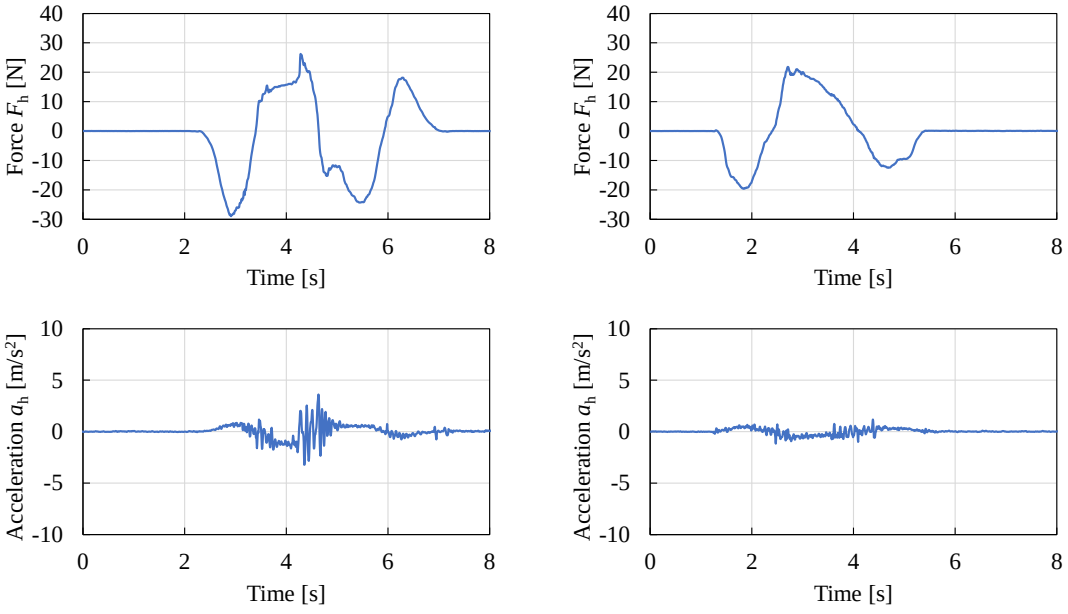
３．３　バランサの特性についての予備実験

３．３．１　人による受動型電動バランサの特性の学習

まず，人が受動型電動バランサの特性を学習する過程を示す．実験条件は，$D_0 = 3$ kg/s，$f_s = f_d = 0.98$ N，錘の質量 $m_w = 5.15$ kg である．人は錘を往復動作した．学習の段階に応じた往復動作の様子を図 3-4 に示す．図 3-4 において F_h は人が受動型電動バランサに与える作用力，a_h は人の動作により発生する加速度である．動作方向が鉛直下向きで負の操作力 F_h が発生する．図 3-4(a)は学習の初期段階，(b)は学習の途中，(c)は人が 10 回以上操作を繰り返した往復動作の様子である．学習初期段階の(a)では，動作方向を切り換えるときに大きな加速度 a_h が生じている．このとき，受動型電動バランサの脱落検知システムがはたらき，サーボが停止する．学習途中の(b)では，(a)よりも小さな加速度 a_h で動作の切り換えを実現できている．このとき，脱落検知システムは作動せず，往復動作を達成できた．10 回以上学習をおこなった(c)では最も小さい加速度で往復動作を実現できている．操作力 F_h に関しても(c)は最小で実現できている．図 3-5 は人の学習の過程を操り動作時に発生する最大加速度 a_{hmax} でまとめたものである．図 3-5 から学習により人は，受動型電動バランサの特性を学習することで最大加速度 a_{hmax} を小さくしていることがわかる．受動型電動バランサは操作力の入力に対し，加速度の出力が 1 次遅れ要素の伝達関数を有するシステムである．そのため，その 1 次遅れの伝達関数を人が学習することで受動型電動バランサの特性に適応した操り動作を実現できている．このような学習を，いわゆる所望な運動が与えられたときに，それを実現できる操作力を計算する逆ダイナミクスモデルがなされていると一般的にいわれている．一方で，協働ロボットアームは，このような特性を学習することなく位置決め制御に則った動作を遂行する．よって，協働ロボットアームの制御システムと受動型電動バランサの制御システムが，干渉する現象がおこる．これが，自律的分散協調における問題点である．



(a) Before learning



(b) While learning (c) After learning

Fig.3-4 Manipulation of an assist device by a person.

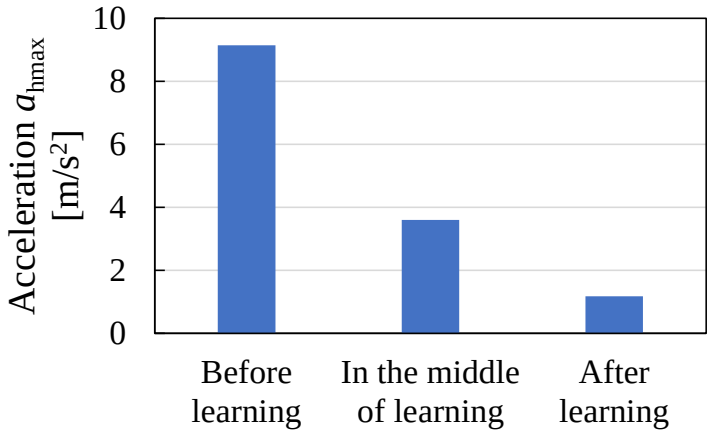


Fig. 3-5 The process by which people learn to assist systems.

３．３．２　バランサの１次遅れ要素の同定

ここでは，バランサの特性についての予備実験の結果を示す．まずは，バランサに推力 f_{in} が入力されたときの応答を 1 次遅れ要素で近似し，等価質量 m_a [kg] と時定数 T_a [s]を同定する．バランサに吊るす錘の質量を m_w [kg]とし推力 f_{in} は一定のステップ入力とする．上下動作それぞれについて実験をおこなった．実験の様子を図 3-6 に，また実験条件を表 3-3 に示す．ここでは，ステップ入力を与える手順について述べる．まず，錘 m_w を吊るし，バランサの力センサでバランス質量 m_w の記憶をシステムにさせる．次に，質量 m_w より，Δm_w だけの錘を手動で急に除去，または追加して検出質量を $m_w \pm \Delta m_w$ として，$f_{in} = \Delta m_{wg}$ のステップ入力としている．そのときの加速度をセンサで計測した．

Table 3-3 First-order delay element identification experiment.

Velocity viscosity coefficient D	0 kg/s
Maximum static / Dynamic Friction f_s / f_d	0 N
Suspended mass m_w	5.15 kg
driving force f_{in}	2.45, 4.9, 7.35 N

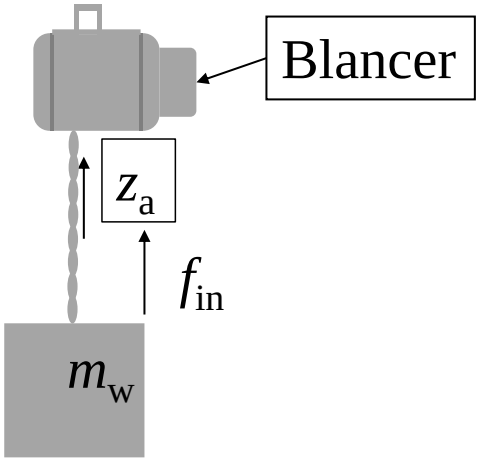


Fig. 3-6 First-order delay element identification experiment.

図 3-7 に推力 f_{in} = 2.45 N としたときの錘の加速度と時間の関係を示す.

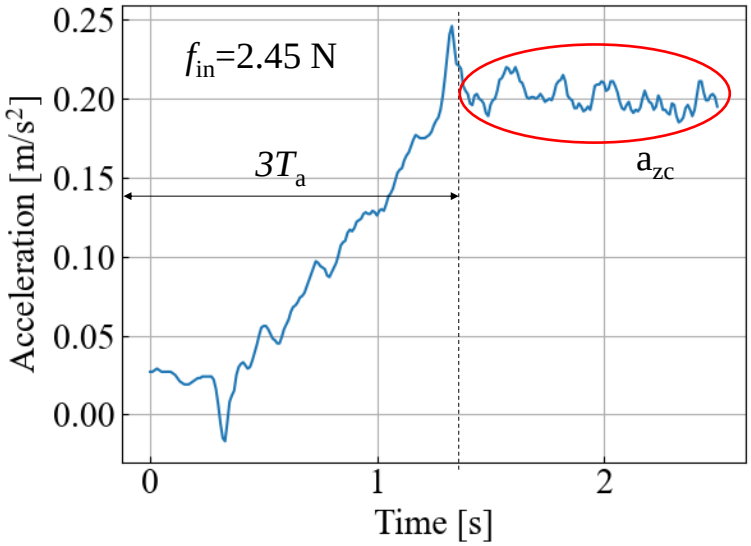


Fig. 3-7 Step response of acceleration to driving force f_{in}.

この図において, 定常値 a_{zc} に達するまでの時間を $3T_a$ とすることで 1 次遅れの時定数 T_a を同定する. また定常値 a_{zc} と推力 f_{in} の関係を単純な運動方程式（式 (3-1)）で近似することで, 等価質量 m_a を同定する.

$$f_{in} = m_a a_{zc} \tag{3-1}$$

推力 f_{in} と定常加速度 a_{zc} との関係を図 3-8 に, 時定数 T_a と推力 f_{in} との関係を図 3-9 に示す.

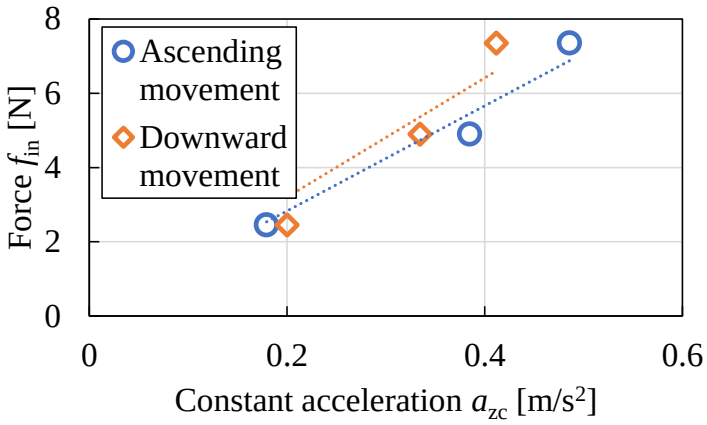


Fig. 3-8 Identification of equivalent masses.

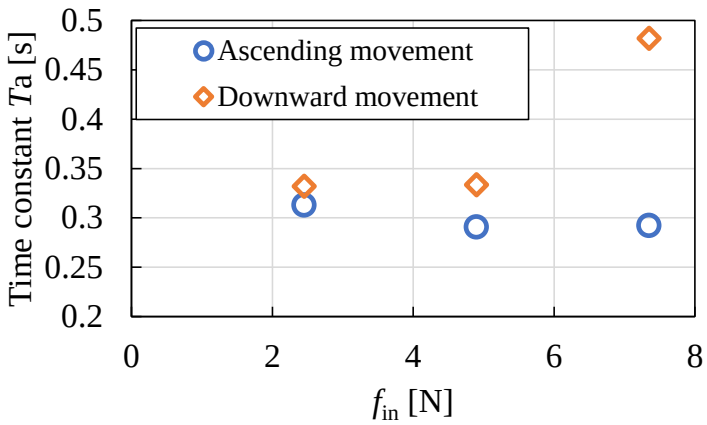


Fig. 3-9 Identification of time constants.

図 3-8 より，上昇動作・下降動作いずれにおいても，バランサの等価質量 m_a = 15.1 kg であることを同定できる．さらに，図 3-9 から，動作方向と推力 f_{in} によって時定数 T_a はほとんど変化せず T_a = 0.33 s であることが同定できた．

３．３．３　バランサの操作力依存の可変粘性係数の同定

次に，バランサの仮想的な速度粘性係数について予備実験をおこなう．一定の推力入力による加速度のステップ応答をみる．実験条件を表 3-4 に示す．

Table 3-4 Conditions for the identification of the velocity-viscosity coefficient.

Velocity viscosity coefficient D_0	6 kg/s
Maximum static / Dynamic Friction f_s / f_d	0 N
Suspended mass m_w	5.15 kg
driving force f_{in}	2.45 N

表 3-4 の条件での実験結果を図 3-10 に示す．ところで，バランサの役割は，m_w の位置や速度に関係なく，$m_w g$ のバランス力を発生させるところにある．さらに，ヒトが m_w を把持し z_a 方向に加減速させる．そのときにヒトの力をアシストするところにもある．

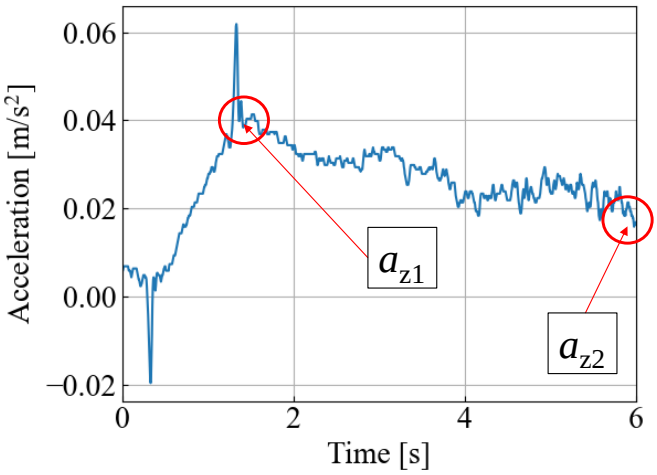


Fig. 3-10 Step response of acceleration with velocity viscosity coefficient added.

図 3-10 から速度粘性が作用した場合，加速度は立ち上がったのち，緩やかに減衰し運動開始から 6 s 程度でオーバーシュートを除いたピーク値 a_{z1} の半分の値 a_{z2} となる．6 s 程度で加速度が半減するような速度粘性係数として，操作力依存可変粘性 [3.10]を想定した．操作力依存可変粘性係数には自然対数を用いた式(3-2)を仮定する．h は操作力，$D(h)$は可変粘性係数，D_0 は操作力が 0 のときの粘性係数，そして A は操作力に対する粘性係数の感度を表すパラメータである．図 3-11 に示すブロック線図で MATLAB/SIMULINK により，シミュレーションをおこなった．シミュレーションは A を変えておこない，$A = 0$ のとき速度粘性係数は一定値となる．このシミュレーションの結果を図 3-12 に示す．

$$D(h) = D_0 \exp(-A|h|) \tag{3-2}$$

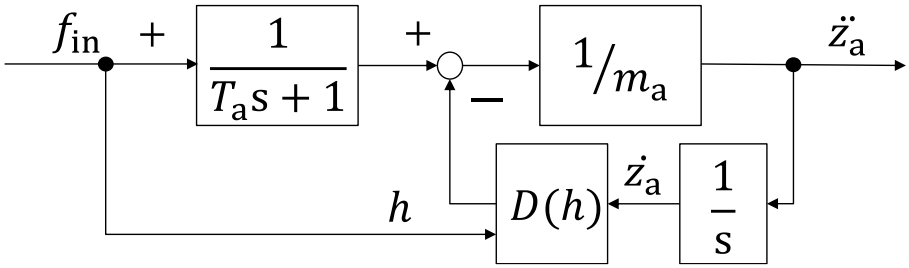


Fig. 3-11 Block diagram including operating force dependent variable viscosity coefficient.

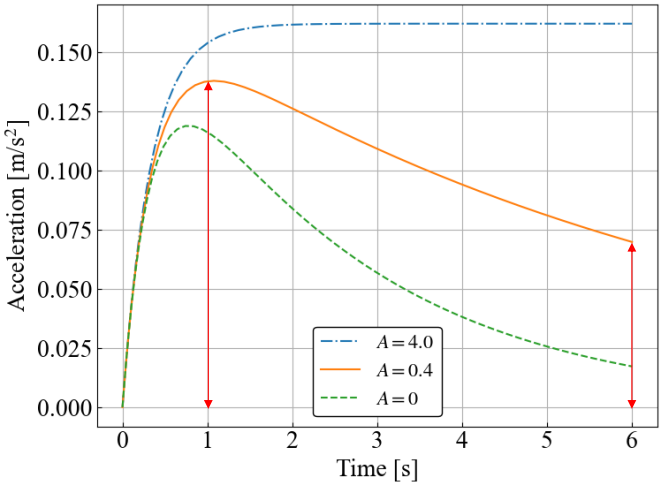


Fig. 3-12 Effect of sensitivity of force-dependent variable viscosity.

この結果から，$A = 0.4$ のとき，実験と同様に加速度が 6 s で半減していることがわかる．よって，以下ではバランサは操作力に対する感度 $A = 0.4$ の可変粘性係数を有するものとして議論をする．

３．４　実験結果および考察

３．４．１　レーザー変位計を用いた静剛性の計測

Hiro 手先に錘による負荷力 P [N]を加えたときの変位を計測する．それにより，Hiro アームの静剛性 k_{r} [N/mm]を算出する．負荷力 P は 2.45 N，4.9 N，7.35 N とした．また，Hiro の姿勢を変え計測をおこなった．姿勢は図 2-2 の LEP(左肘関節)に注目し，LEP の角度(上腕部と前腕部のなす角)を LEP = 45，90，180 deg.の 3 姿勢を対象とした．この姿勢は LEP の姿勢を固定し，手先姿勢の 3 軸方向の傾きが 0.5 deg.以下となるよう設定した．静剛性の算出は，変位と力の関係を切片 0 で最小二乗法による直線近似でおこなった．図 3-13 に各姿勢に対する算出した静剛性 k_{r} をまとめる．図 3-13 から LEP の角度が大きくなり，つまり片持ちはりの状態に近くなるほど，静剛性 k_{r} は小さくなることがわかる．また，静剛性

k_rが計測できたことから，すくなくとも本実験の負荷力の範囲，すなわち可搬質量の 12.5 ~ 37.5 %では Hiro には位置の定常偏差をなくす，積分制御はなされていないことがわかる．これについて，動剛性とともに有限要素解析(FEA)を用いたモデルとの比較での考察を後述する．

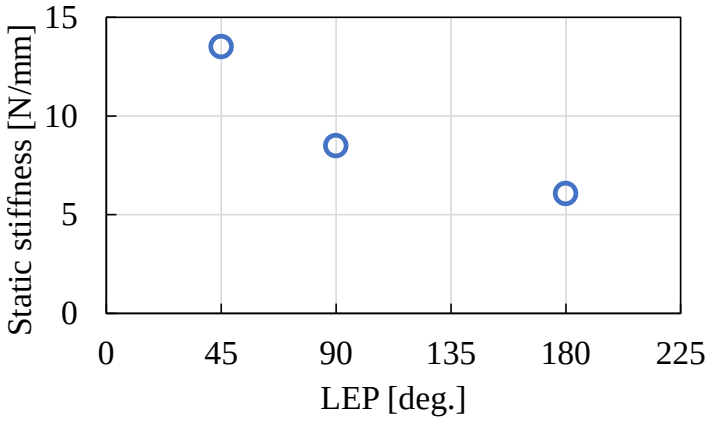


Fig. 3-13 Static stiffness measurement.

３．４．２　ワイヤレス力・加速度センサを用いた固有振動と減衰比の計測

あらかじめセンサを介して錘をナイロン糸で吊るし，そのナイロン糸をハサミで切断することで瞬間的な負荷力 P の変化を与える(瞬間除荷)．そのときの負荷力 P の変化と同じ方向(図 2-1 での z_l 方向)の加速度の振動波形を周波数解析することで各姿勢の固有振動を算出した．各条件は 3 回おこない，その平均の動剛性 f_r を用いている．周波数解析には Python の科学計算モジュール Scipy を用いた．表 3-2 で示したようにそのサンプリング周波数は 200 Hz である．図 3-14 に負荷力 P = 2.45 N，LEP = 45 deg.の条件での力と加速度の同時計測の様子を示す．図 3-14 から，負荷力 P の瞬間除荷によって Hiro 手先に振動が発生することがわかる．そして，その振動は 1 s 程度で減衰して元の状態に戻っている．このことから，Hiro には振動を抑制する制御，すなわち微分制御とみなせるものが組み込まれていることがわかる．図 3-15 に各姿勢で算出した動剛性(各姿勢における固有周波数)f_r [Hz]をまとめる．図 3-15 から Hiro の動剛性は姿勢が片持ちはりのような状態に近づくにつれ，小さくなっていることがわかる．

図 3-16 は減衰比 ζ の計算結果をまとめたものである．図 3-17 はサーボ停止時の計測の様子である．したがって，図 3-17 に示すように，アームはナイロン紐で吊り下げられて姿勢が固定されている．姿勢は LEP，θ_{11}＝90deg 程度である．このとき，サーボ起動時と同様の測定を行い，瞬時除荷による減衰振動の固有振動数 f_r と減衰比 ζ を測定した．これらの測定結果を図 3-18 と図 3-19 にまとめ

た．

図 3-16 から，サーボ起動時の減衰比 ζ は，負荷力 P によって変化するが，姿勢によってあまり変化しないことがわかる．これはロボットの制御系の影響によるものと考えられる．図 3-17 に示す方法で測定したサーボ停止時の固有振動数は，どの負荷力 P に対しても約 15Hz であり，サーボ起動時と同程度である．したがって，系の固有振動数はサーボ剛性よりも構造的な要因の影響の方が大きい．また，サーボ停止時の減衰比 ζ をまとめた図 3-19 を見ると，負荷力 P によって平均値が約 0.06 となっており，ロボットアームの構造的な減衰比を特定することができる．

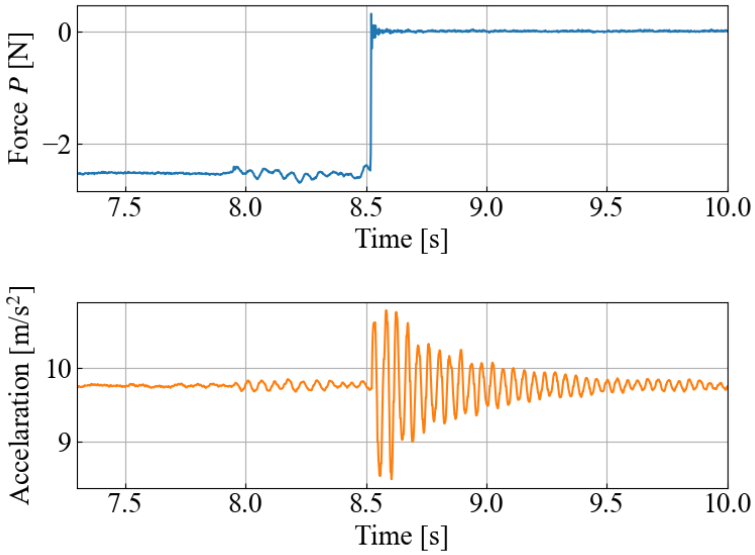


Fig. 3-14 Simultaneous measurement.

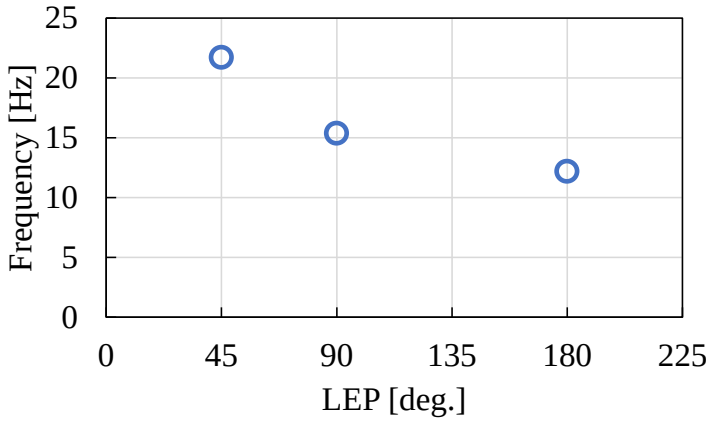
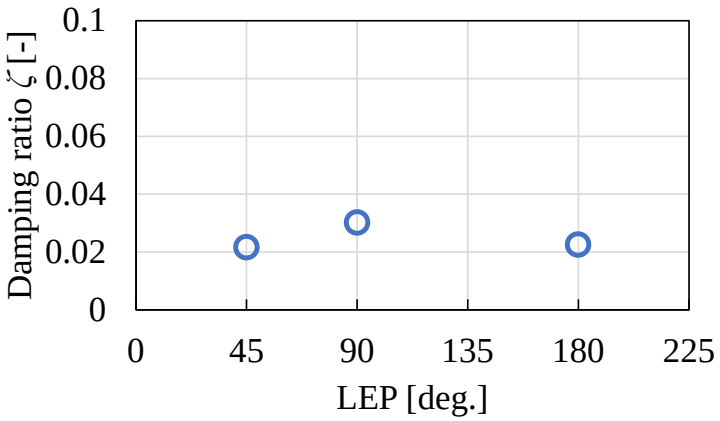
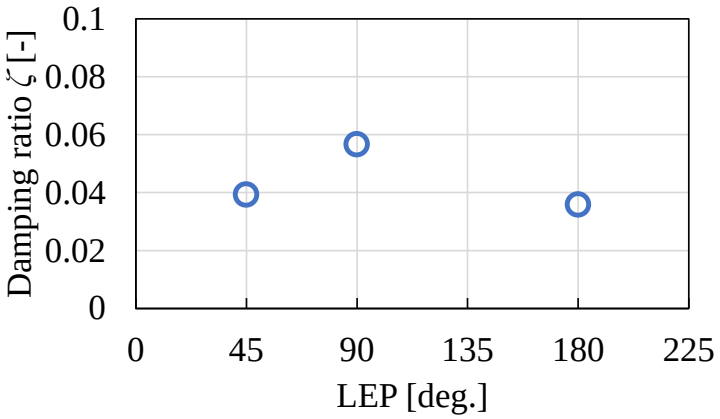


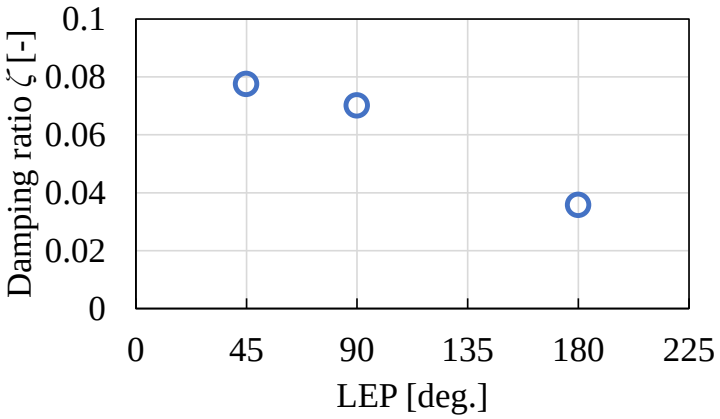
Fig. 3-15 Dynamic stiffness measurement.



(a) P = 2.45 N



(b) P = 4.9 N



(c) P = 7.35 N

Fig. 3-16 Damping ratio at servo startup.

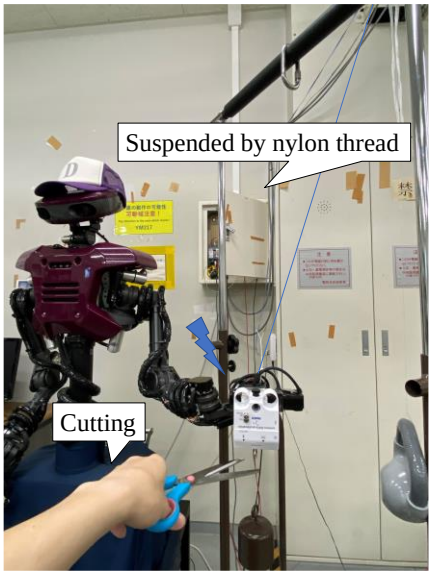


Fig. 3-17 Measurement when the servo is stopped.

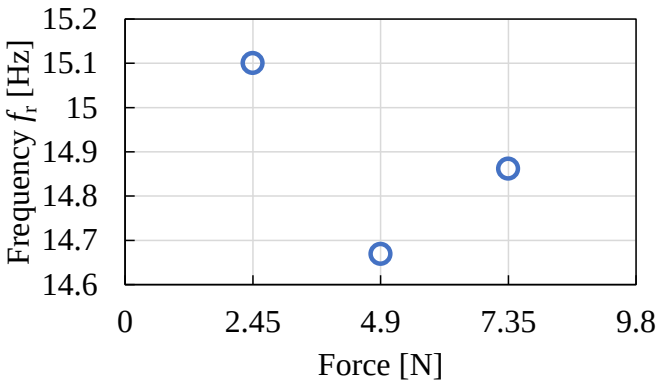


Fig. 3-18 Natural frequency at servo stop.

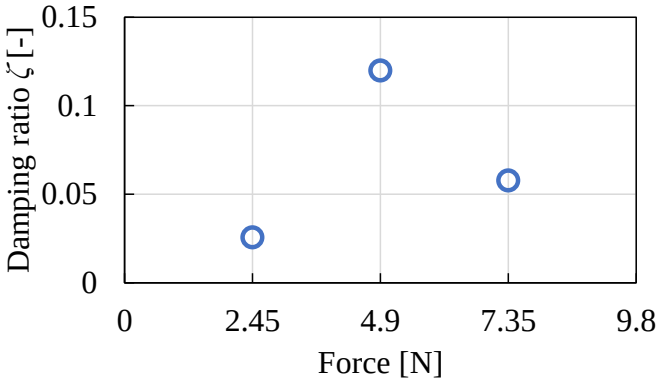


Fig. 3-19 Damping ratio at servo stop.

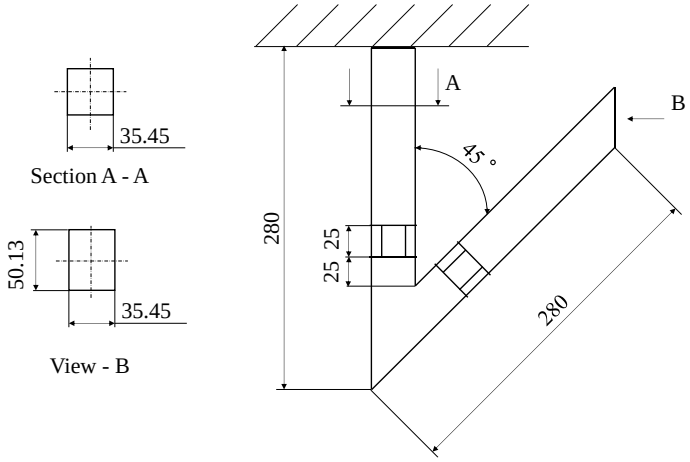
３．４．３　単純なはり形状とヒンジ機構を有するモデル化による有限要素解析

それぞれの姿勢を単純なはり形状および，肘関節剛性を考慮するヒンジを有する形状でモデル化し，実験との比較をおこなう．モデル化の対象は図 2-2 および表 2-1 に示す Hiro のリンク L_4（L_{11}）と L_5（L_{12}）で直径 φ = 40 mm 円柱形状であるが，メッシュ処理の容易化のためその円柱と同一の断面積を有する正四角形，1 辺 b = 35.45 mm で近似した．ヒンジ部の切込み量は $b/4$ とした．簡易化のため，L_4（L_{11}）と L_5（L_{12}）の差を考慮していない．その他，有限要素解析(FEA)で用いた解析条件を表 3-5 に示す．それぞれの姿勢に対するモデルを図 3-20 に示す．

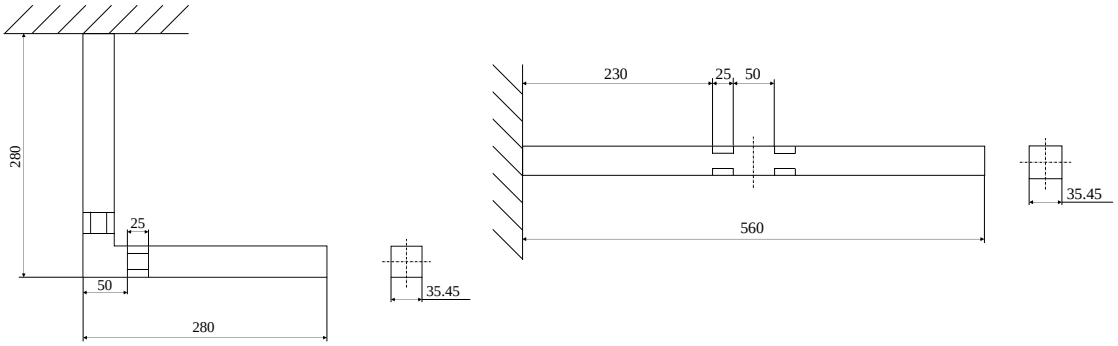
Table 3-5 FEA Conditions.

Material properties	Alminum
Young's modulus E	69 GPa
Poisson's ratio	0.3
Mass density	2700 kg/m^3
Mesh Shape	Tetrahedron / Tetragonal pyramid

動剛性の FEA の変形図を図 3-21 に，結果をまとめたものを図 3-22 に示す．今回の FEA では，実験値との一致が目的ではない．LEP = 180 deg.で除した値で静剛性と固有振動モードの比較をおこない，モデル化の精度を確認した．それぞれの比較を図 3-23，図 3-24 に示す．

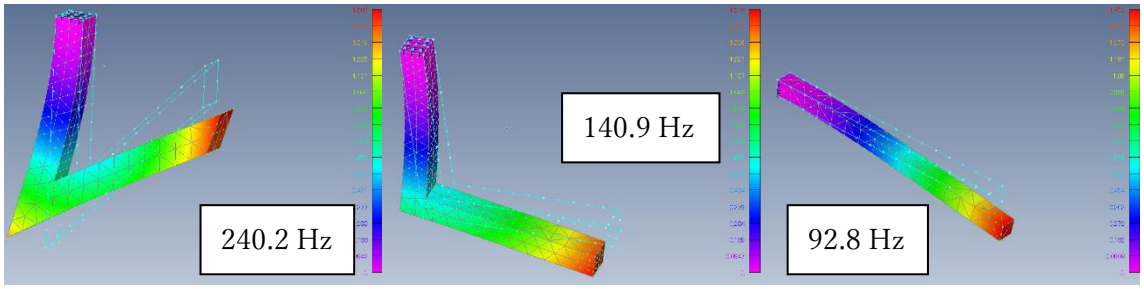


(a) LEP = 45 deg.

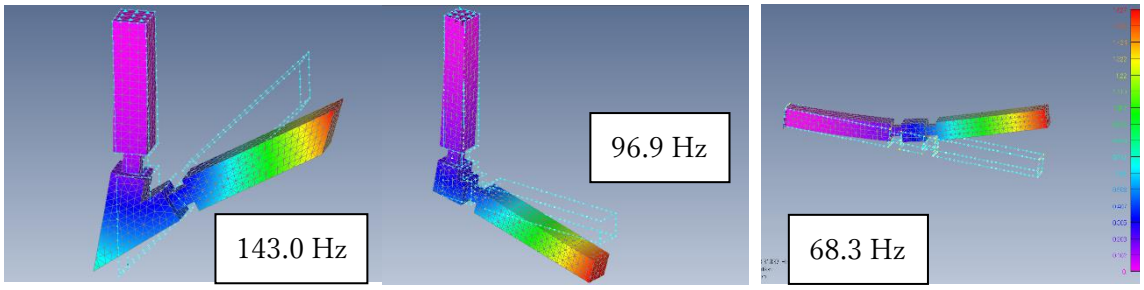


(b) LEP = 90 deg. (c) LEP = 180 deg.

Fig. 3-20 FEA model.

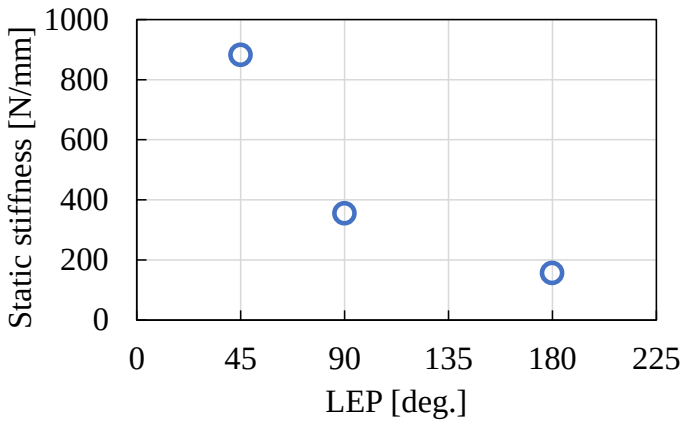


(a) LEP = 45 deg. (b) LEP = 90 deg. (c) LEP = 180 deg.

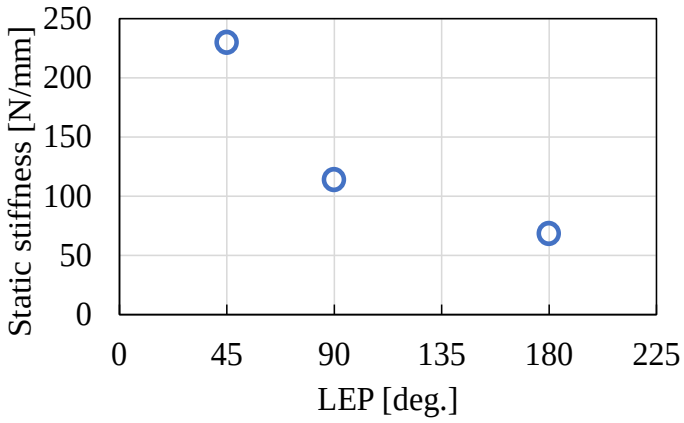


(d) LEP = 45 deg. hinge (e) LEP = 90 deg. hinge (f) LEP = 180 deg. hinge

Fig. 3-21 FEA deformation.



(a)Simple static stiffness



(b) Hinge static stiffness

Fig. 3-22 FEA results.

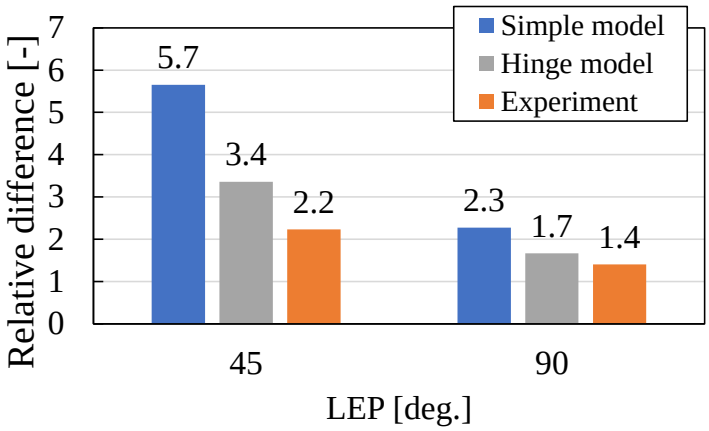


Fig. 3-23 Comparison of static stiffness.

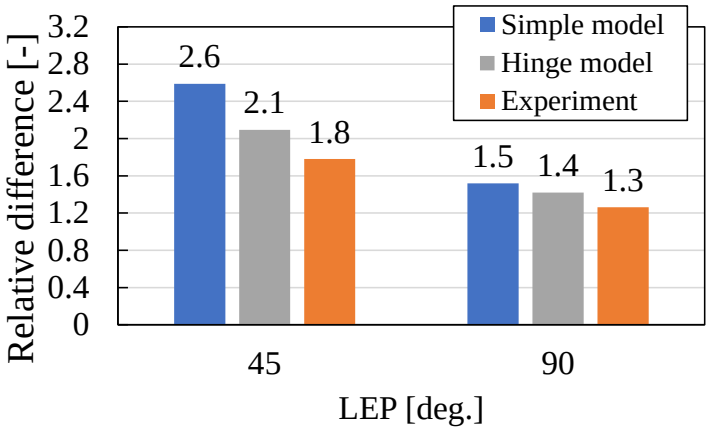


Fig.3-24 Comparison of dynamic stiffness.

この比較により，静剛性，固有振動ともに単純なはりモデルを用いるよりもヒンジを有する構造でのモデルが実験との傾向に近くなることがわかる．これは，ヒンジにより，Hiro の肘関節のサーボモータの特性を再現できているためであるといえる．リンク接合部での剛性の低下を，ヒンジ構造を有するモデルで特徴づけることができている．

３．５　結　　言

本章では，協働ロボットの超可搬動作を具現化するアシスト装置の自律分散型の制御を提案した．人がアシスト装置を操るときには，その特性を学習し操り動作を実現する．しかし，一般にロボットはそのような特性を学習することなく動作する．その結果，次の結論を得た．

(1) 現場で容易に計測が可能なワイヤレス Bluetooth 無線通信を有する慣性センサの加速度情報により，ステップ関数での力の入力に対して受動型電動バランサが 1 次遅れの伝達関数を有することがわかった．人はその特性を学習することで，アシスト協調を実現できていることが判明し，ロボットでの動作における課題となることもわかった．

(2) 新たに提案している協働ロボットのパッシブ電動アシスト制御のモデル化のため，非接触，無線計測により，協働型ロボットアームの静剛性及び，動剛性を計測した．その結果，可搬質量が 2 kg 程度の協働型ロボットには定常偏差をなくす積分制御はなく，振動を抑制する微分制御が組み込まれていることがわかった．

(3) 単純なはりモデルとヒンジ構造を用いたモデルを用いて有限要素解析をおこなった．その結果，ヒンジ有りモデルがサーボモータ部の剛性低下を再現できており，モデルとして有効でありえることがわかった．

参考文献

3.1) 村山英之，藤原弘俊，人と協働する自動車組み立てロボットの安全技術，日本ロボット学会誌，Vol.29, No.9 (2011), pp.783-785.

3.2) 吹田和嗣，自動車製造分野における人を中心としたロボットとの協働・協調化の取り組み，日本ロボット学会誌，Vol.40, No.7 (2022), pp.593-596.

3.3) Hiroaki Hanai, Toshiki Hirogaki, Mikio Ozawa, and Eiichi Aoyama, Investigation of Autonomous Cooperation between Industrial Cooperative Humanoid Robot and Passive Balancer, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, Vol. 11, No. 12 (2022), pp. 884-890.

3.4) 小澤幹生，花井宏旭，廣垣俊樹，青山栄一，超可搬作業を可能とする協働型ロボットとアシスト装置のミュージカルソー操り動作, 精密工学会関西地方講演会講演論文集，pp.54-55，2022.

3.5) 伊藤英明，樫田美雄，小松真弓，中村健信，尾崎史典，齊藤ゆみ，川路茂保，熟練技能中心設計 : 電動パワーステアリング開発におけるイノベーションの創出，情報処理学会論文誌，Vol.49, No.4 (2008), pp.1581-1593.

3.6) 栗重正彦，熊本博光，西原修，電動パワーステアリングの操舵トルク低減制御方式 : オブザーバを用いた発振周波数に対するステアリング角速度制御(機械力学,計測,自動制御)，日本機械学会論文集 C 編，Vol.68, No.675 (2002), pp.3238-3245.

3.7) 柴崎惣，徳光啓太，木嶋龍吉，呉世訓，エコで快適！電動アシスト自転車，電気学会誌，Vol.130, No.9 (2010), pp.624-627.

3.8) 角谷和重，古荘純次，電動アシスト自転車用統合シミュレータの開発，電気学会論文誌 D（産業応用部門誌），Vol.123, No.11 (2003), pp.1330-1338.

3.9) 藪下英典，平田泰久，小菅一弘，パワーアシスト自転車の走行抵抗可変型制御(機械力学,計測,自動制御)，日本機械学会論文集 C 編，Vol.69, No.680 (2003), pp.1031-1036.

3.10) 武居直行，菊植亮，佐野明人，望山洋，澤田英明，藤本英雄，位置決め作業アシストのための操作力依存可変ダンピング制御，日本ロボット学会誌，Vol.25，No.2，pp.306-313，2007.

第４章　協働型ヒューマノイドロボットによる

ミュージカルソーの超可搬打撃動作の考察

４．１　緒　　言

前章にて，産業用協働ヒューマノイドロボットによるミュージカルソーの打撃音サウンドフィードバックにおける超可搬動作に向けたパワーアシスト機構との自律協調制御に対して，ロボットアームと受動型電動アシストリフタに対するモデル化を検討した．その一方で仮想内部モデル理論をパワーアシスト装置に利用すると人間の操作力に素早く追従するため，操作性はよいが，剛性の高い環境に接触すると位置制御系の遅れにより不安定になることが報告されている[4.1),4.2)]．本研究でも，協働ロボットとアシスト装置の協調には不安定な挙動が現れることが予想される．

そこで本章[4.3)～4.5)]では，協働ロボットとアシスト装置による協調のモデル化と協調に影響するパラメータについて検討する．前章で導入して現場での有効性を示したワイヤレス無線センサをモニタリングに導入しながら，弾性力による外乱を組み込み，協働ロボットの片腕の可搬質量(ペイロード)を超えるプリロード(余荷重)により大変形させたミュージカルソーに対し，さらに変形制御の動作を具現化して打撃動作を協調させた発音の応用動作について述べる．

４．２　ロボット-アシスト装置系のシステム同定

４．２．１　ヒト-アシストシステムとロボット-アシストシステムの比較

まず，ヒト-アシスト協調とロボット-アシスト協調の差異に注目する．図 4-1 は $D_0 = 3$ kg/s，$f_s/f_d = 0.98$ N，$m_w = 5.15$ kg の条件でのヒト-アシスト協調とロボット-アシスト協調の比較である．z_a 負方向にロボットは 200 mm，ヒトも同程度の移動量とした．この図からわかるように，ヒト-アシスト協調では動作の開始と終了時に大きな力が生じているが，動作中の力はほとんど一定である．しかし，ロボット-アシスト協調動作では，動作中に振動成分がみられる．以降で述べるが，ロボットは位置制御と速度制御のループをもつ位置決め制御を構成している．この制御系にアシストによる入力が入るため動作が不安定になると考えられる．一方で，ヒトはロボットにないフィードフォワード制御，フィードバック制御を構成しているため安定した動作ができると考えられる．例えば，稲葉らはヒトの開ループ整形特性に注目してそのモデル化をおこなっている[4.6)]．ヒトに対する電動パワーアシストの実用化例としては，自動車のパワーステアリング，

自動車のペダル運動などが代表例である．その制御は，モータの慣性，トルク変動を考慮した応答周波数に注目したものである [4.7]．また，図 4-2 にロボットのアシスト有無での比較を示す．実験条件は図 4-1 のときと動作方向が正であることを除き同様である．このとき，アシスト無しでは生じない振動がアシスト協調時に発生していることがわかる．この原因について，錘の質量 m_w の慣性力が影響しているとしてモデル化と考察をおこなう．

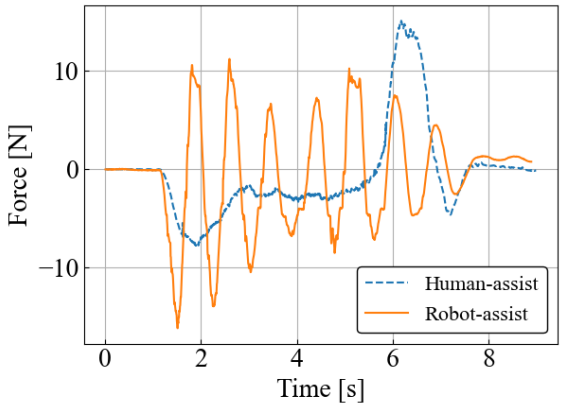


Fig. 4-1 Comparison of human-robot assist coordination.

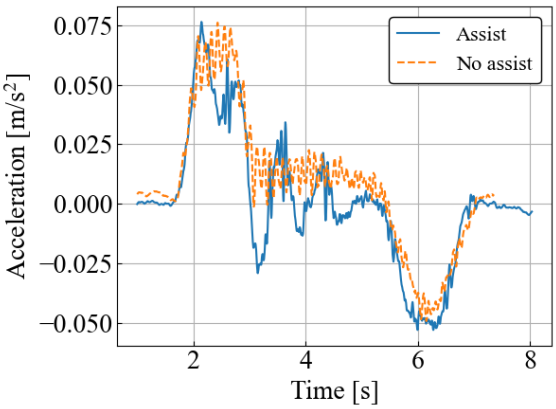


Fig. 4-2 Comparison of robot motion with and without assistance.

４．２．２　ロボットの位置決め制御

実際のロボットの位置決め制御は，複数のサーボモータによりおこなわれる．さらに，電流等のフィードバックループなども組み込まれた複雑なものであるが，ここではマイナーループに速度制御系，メジャーループとして位置制御系で構成されたモデルを想定する [4.8]．この制御系を図 4-3 に示す．ここで，z_{rr} は位

置制御の指令値であり，z_c はロボット手先の位置である．m_r はロボットの等価質量であり，f_c は m_r に対する推力である．K_{pp} は位置比例ゲイン，K_{vi} は速度積分ゲイン，K_{vp} は速度比例ゲインである．K_{ff} は I-P 速度制御系と PI 速度制御系を切り換えるパラメータであり，$K_{ff} = 0$ のとき速度 I-P 制御系，$K_{ff} = 1$ のとき速度 PI 制御系である．以下，位置 P 速度 I-P 制御系を P-I-P 制御，位置 P 速度 PI 制御系を P-PI 制御と略す．$1/m_r$ に入力されるまでがロボットの制御系，$1/m_r$ に入力されたあとがロボットの制御対象である．

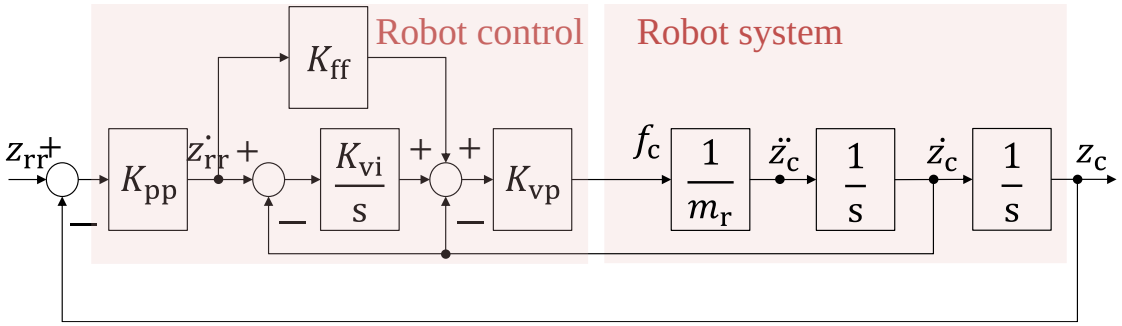


Fig. 4-3 Position control system of a robot.

ロボットの制御系のパラメータを実験的に同定することは難しい．そこで，ロボットの等価質量 m_r をロボット本体の質量 20 kg であることから片アームが 5 kg 程度とし，動作中の負荷はそれよりも小さくなることを考慮して 1.8 kg とする．次に，制御パラメータの決定をおこなう．ここでは P-I-P 制御系（$K_{ff} = 0$）を想定する．P-I-P 制御系において 3 重極の極配置は応答性がよいことが知られている [4.9]．位置制御系の伝達関数

$$G_{xr}^{\mathrm{I-P}}(s) = \frac{\omega_{vc} K_{vi} K_{pp}}{s^3 + \omega_{vc} s^2 + \omega_{vc} K_{vi} s + \omega_{vc} K_{vi} K_{pp}} \tag{4-1}$$

で，$K_{pp} = \beta_1 \omega_{vc}$，$K_{vi} = \beta_2 \omega_{vc}$ とおくと次式を得る．ただし，$\omega_{vc} = K_{vp}/m_r$ である．

$$G_{xr}^{\mathrm{I-P}}(s) = \frac{\beta_1 \beta_2 {\omega_{vc}}^3}{s^3 + \omega_{vc} s^2 + \beta_2 {\omega_{vc}}^2 s + \beta_1 \beta_2 {\omega_{vc}}^3} \tag{4-2}$$

この式が 3 重極-$\gamma\omega_{vc}$ をもつ次の伝達関数と等しいと仮定する．

$$G_{xr}^{\mathrm{I-P}}(s) = \frac{(\gamma \omega_{vc})^3}{(s + \gamma \omega_{vc})^3} \tag{4-3}$$

式（4-2）と式（4-3）の分子の定数と分母多項式の係数をそれぞれ比較して，β_1 = 1/9，β_2 = 1/3，γ = 1/3 を得る．このときのゲインの比は次のようになる．

$$K_{\mathrm{pp}} : K_{\mathrm{vp}} : K_{\mathrm{vi}} = 1 : 9m_{\mathrm{r}} : 3 \tag{4-4}$$

この関係を用いることで, 制御パラメータを容易に決定することができる. 以下では，K_{pp} = 2.2，K_{vp} = 35.64，K_{vi} = 6.6 とする．

４．２．３　アシスト装置の摩擦のモデル化

ここでは, アシストの摩擦力を不連続摩擦としてモデル化する. バランサシステム内で，モータ回転数より速度 v を検出して摩擦力 f を付加しているとする．実際には物体が個体面と接触し，その面に対して速度 v で移動しているモデルである．一般に不連続摩擦モデルでは，摩擦力 f は以下のように表される．ここで，h は物体にかかる外力すべての合力である．

$$f(v,h) = \begin{cases} -h & \text{if } v = 0 \wedge |h| \le f_{\mathrm{s}} \\ -\mathrm{sgn}(h) f_{\mathrm{s}} & \text{if } v = 0 \wedge |h| > f_{\mathrm{s}} \\ \phi(v) & \text{otherwise} \end{cases} \tag{4-5}$$

$f_{\mathrm{s}} > 0$ は最大静止摩擦力であり，$\phi(v)$はすべての $v \neq 0$ において $\phi(v)v \le 0$ を満たす任意の関数である．ここでは $\phi(v)$をクーロン摩擦モデルと速度に比例する粘性力で以下のように表すこととする．

$$\phi(v) = -\mathrm{sgn}(v) f_{\mathrm{d}} - Dv \tag{4-6}$$

一般に，式（4-6）で表される不連続摩擦モデルを離散時間シミュレーションに用いるのは困難である．これは $v = 0$ における f の定義に起因する（図 4-4）．そこで, 本報では有限幅の零速度領域を定義することでこの問題を回避する [4.10]. この手法は以下のように表される．

$$f(v,h) = \begin{cases} -h & \text{if } |v| \le \varepsilon \wedge |h| \le f_{\mathrm{s}} \\ -\mathrm{sgn}(h) f_{\mathrm{s}} & \text{if } |v| \le \varepsilon \wedge |h| > f_{\mathrm{s}} \\ \phi(v) & \text{otherwise} \end{cases} \tag{4-7}$$

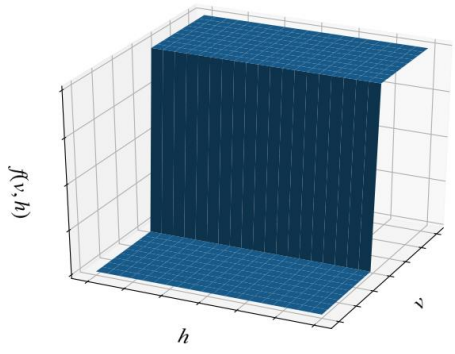


Fig. 4-4 Coulomb friction.

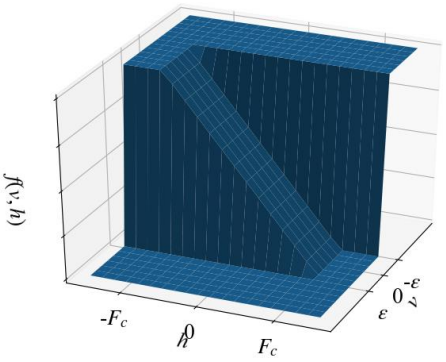


Fig. 4-5 Karnopp friction.

ここで，ε は微小な値であり，この値以下の速度は零とみなされている．Karnopp モデルの $f(v, h)$を図 4-5 にプロットする．ε=1.0×10^{-6} とする．

４．２．４　ロボットとバランサ協調のモデル化

さて，これによりロボットとバランサの協調モデルは以下のブロック線図で表現できる（図 4-6）．このモデルでは，バランサの粘性力，摩擦力 $f(\dot{z}_c,h)$さらに加速度の入力に対するアシスト力 $m_a\ddot{z}_c$と懸架した錘の質量から生じる慣性力 $m_w\ddot{z}_c$がロボットの位置決め制御の外乱入力となる．

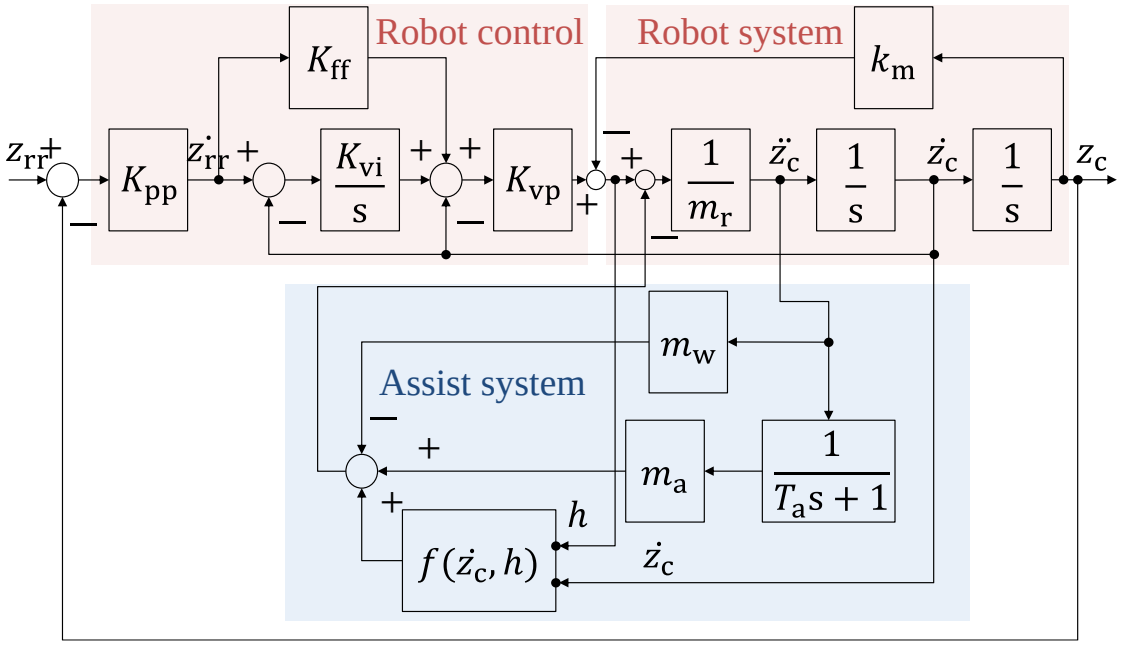
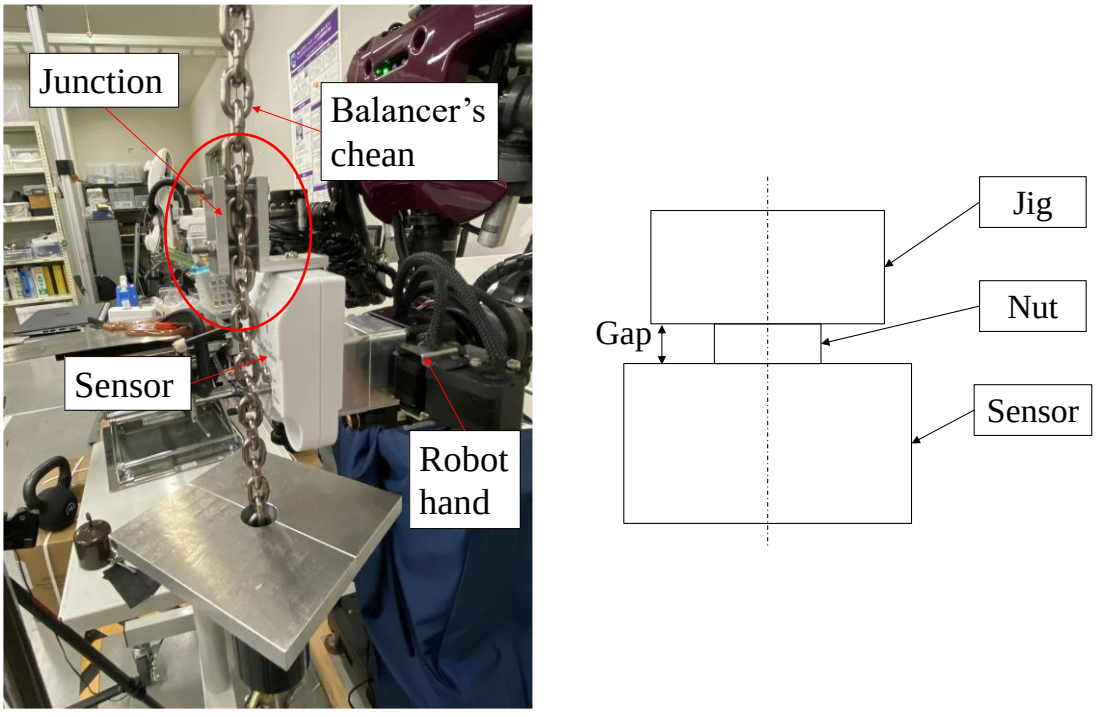


Fig. 4-6 Block diagram of the robot and assist coordination system.

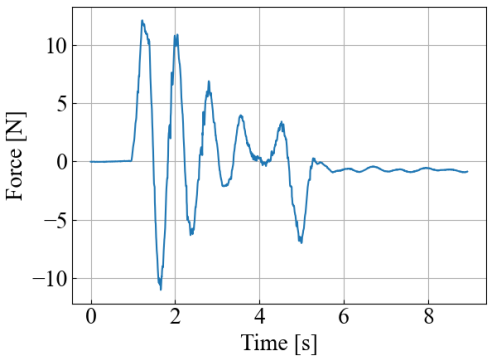
ここで，錘の質量を変えてロボットとバランサの協調動作の実験をおこなった．D_0 = 3.0 kg/s，$f_s = f_d$ = 0.98 N としロボットの z_l 方向の移動量は 200 mm である．ロボットは最大でおよそ 50 mm/s になる台形速度制御で動作した．図 4-7 に実験の様子を示す．バランサとロボット手先に固定したセンサは治具を介してボルト 2 本で固定している．図 4-8 は錘の質量 m_w を 5.15 kg と 8.92 kg したときの力と時間の関係である．ここで，グラフの縦軸(Force)はロボットエンドエフェクタに生じる力を計測しているものである．

図 4-8 (a)，(b)は錘の質量 m_w = 5.15 kg の上昇/下降動作の手先にかかる力であり，ともに動作が成功した．図 4-8 (c)，(d)は錘の質量 m_w = 8.92 kg の上昇/下降動作の手先にかかる力であり，ロボット手先に力が生じ続け動作が失敗した．同条件のもと，図 4-6 のモデルを用いてシミュレーションをおこなう．図 4-6 での f_c の値を実験での力センサの値と比較する．ただし動作方向の違いは考慮しない．シミュレーションの結果を図 4-9 に示す．ここでの力は $1/m_r$ に入る前の信号の値である．

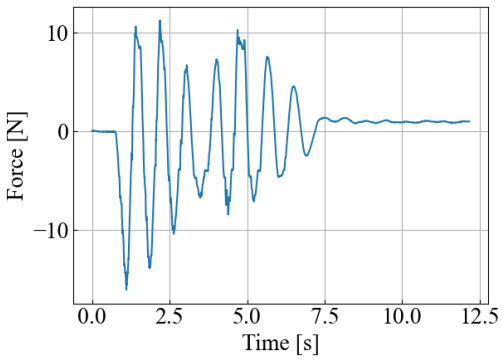


(a) Connection　　(b) Connection of sensor and jig

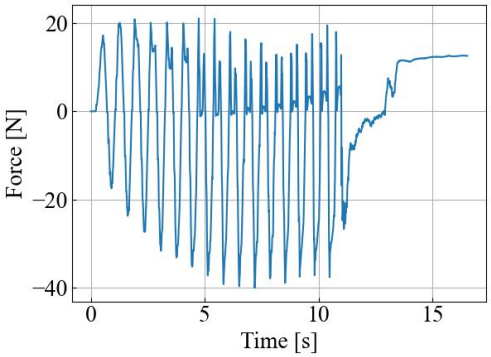
Fig. 4-7 Sensors fixed to balancer and robot hand.



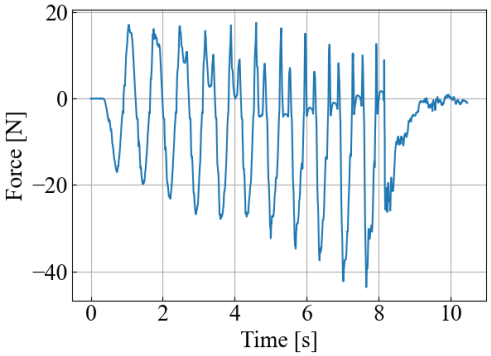
(a) Successful upward motion at m_w = 5.15 kg



(b) Successful descending motion at m_w = 5.15 kg

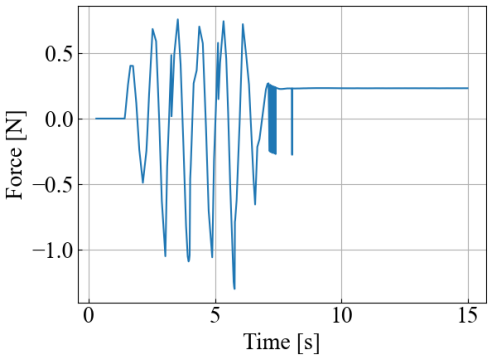


(c) Failed upward motion at m_w = 8.92 kg

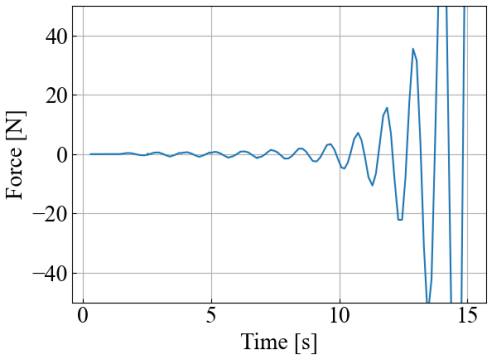


(d) Failed descending motion at m_w = 8.92 kg

Fig. 4-8 Robot and balancer cooperative behavior.



(a) m_w = 5.15 kg, success



(b) m_w = 8.92 kg, failure

Fig. 4-9 Simulation of robot and balancer coordination.

図 4-9(a)から，協調動作が達成できるときの実験の様子をモデルで再現できていることがわかる．一方で，図 4-9(b)錘の質量を大きくした場合の協調時の様子は実験とモデルで乖離がみられる．実験では振動力が発生し，その振動が大きくなりある時刻で振動はほぼ一定となる．しかし，モデルでは振動力の振幅は一定になることなく発散に向かっている．そのため，本モデルは協調動作失敗の様子を再現できないものである．一方で，実験とモデルどちらもステップ入力時の錘の質量 m_w の変化による安定性の変化がみられ，その点では実験とモデルは一致しているものといえる．したがって，提案したモデルは実験の波形を十分に再現するものではないが，ステップ入力時の安定性に錘による慣性力が影響することを説明できる．

また，本モデルではチェーンの繰出し長さが変わることによる重量の変化を考慮していない．そこで予備実験によりバランサのチェーンの線密度 ρ を 0.35 kg/m と同定した．これはチェーンの繰出し長さが 100 mm 変化すると 35 g 質量が変化することを意味する．バランス状態からのチェーンの繰出し長さの変位は図 4-6 でいう z_c で表される．よってチェーンの線密度 ρ を考慮すると，錘 m_w からなる質量m_w'は式(4-8)のように書ける．また，図 4-6 のブロック線図は図 4-10 のように書き直される．このモデルを用いて図 4-9(b)の条件でのシミュレーションをおこなった．その結果が図 4-11 である．図 4-11 から，チェーン線密度 ρ を考慮しても実験値との乖離は改善されていない．チェーン線密度の有無で振動力の振動数がずれるのはチェーン繰出し長さの変化が系の等価質量に影響を与えるためと考えられる．

$$m_w' = m_w - \rho z_c \tag{4-8}$$

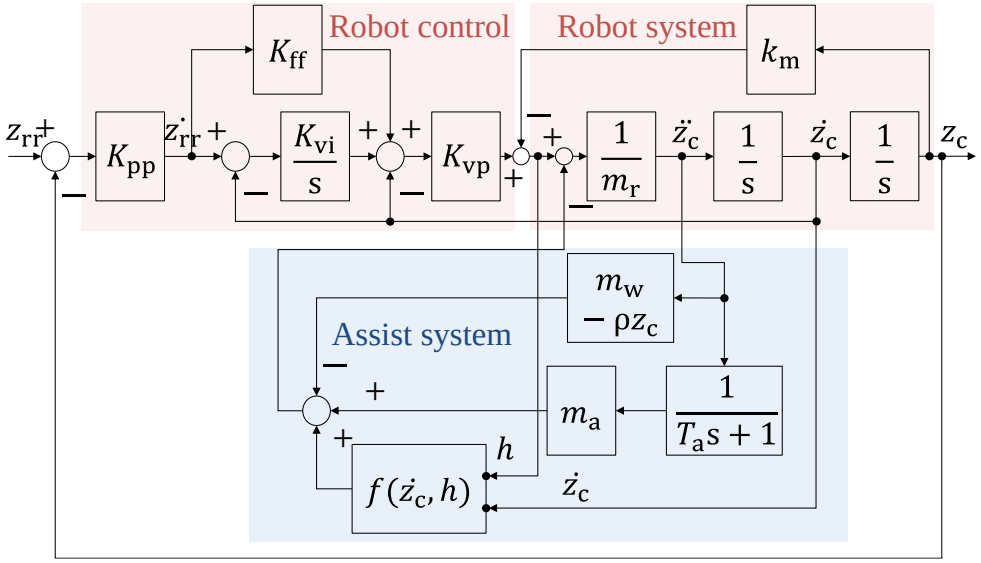


Fig. 4-10 A model that takes into account the linear density of the chain.

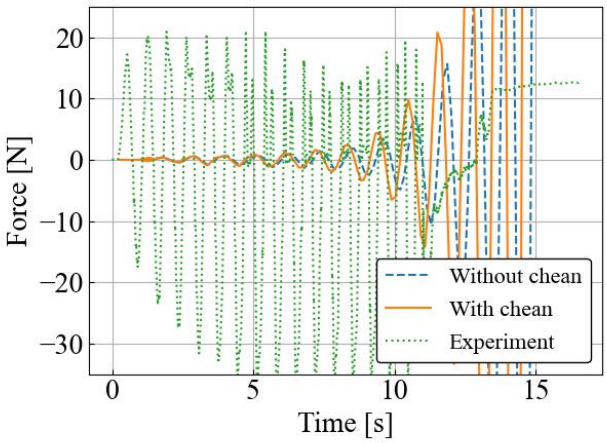
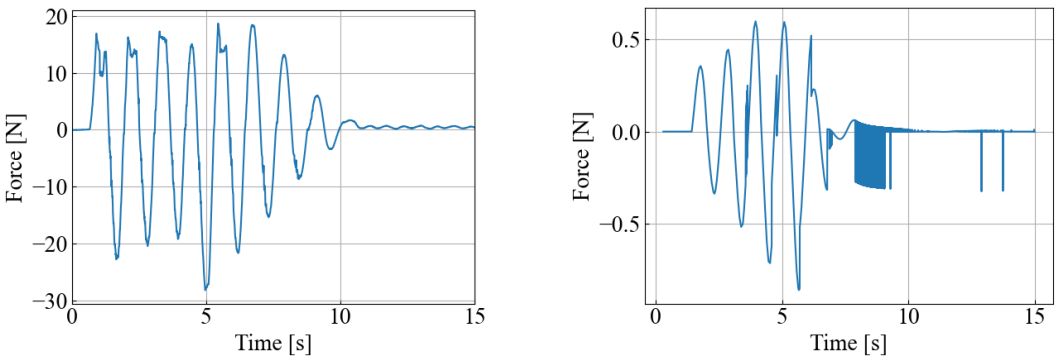


Fig. 4-11 Effect of linear density of chain.

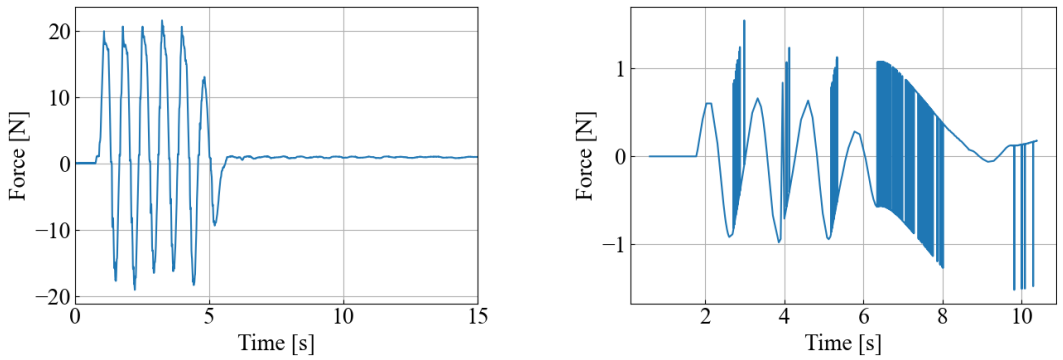
４．２．５　バランサのインピーダンスが協調動作に与える影響

ロボットとバランサの協調では，より大きな質量の搬送物を速く運搬できることが好ましい．そこでバランサのインピーダンス制御のパラメータを変更し，粘性力と摩擦力が協調の成否に及ぼす影響について考察する．錘の質量 m_w = 8.92 kg，D_0 = 10.0 kg/s，$f_s = f_d$ = 0.98 N 条件下での実験結果とシミュレーションを図 4-12 に示す．錘の質量 m_w = 8.92 kg，D_0 = 3.0 kg/s，$f_s = f_d$ = 4.9 N 条件下での実験結果とシミュレーションを図 4-13 に示す．動作方向は上昇動作とする．ロボットは最大でおよそ 50 mm/s，加減速の加速度の大きさが一定 150 mm/s^2 となる台形速度制御とした．ここで，グラフの縦軸(Force)はロボットエンドエフェクタに生じる力を計測しているものである．



(a) Experiment　　(b) Simulation

Fig. 4-12 Effect of viscous forces.



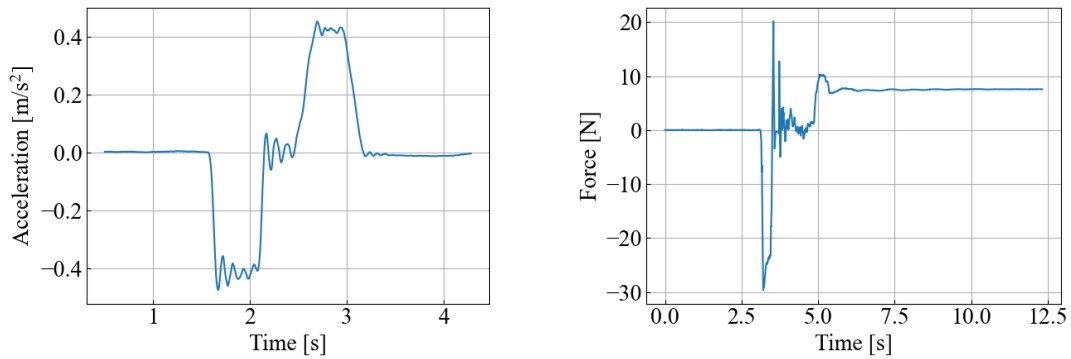
(a) Experiment　　(b) Simulation

Fig. 4-13 Effect of frictional force.

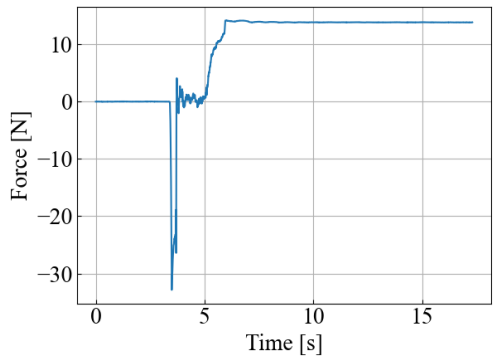
これらの図から，バランサの粘性力と摩擦力を変えることで搬送質量が大きくなっても系が不安定にならず，協調動作を実現できることがわかる．ただし，図 4-13 の時刻 6.5 ~ 8 s あたりでみられる不自然な振動力は不連続摩擦が影響していると考えられる．Karnopp のモデルでは設定した零速度域付近で挙動が不安定になる．

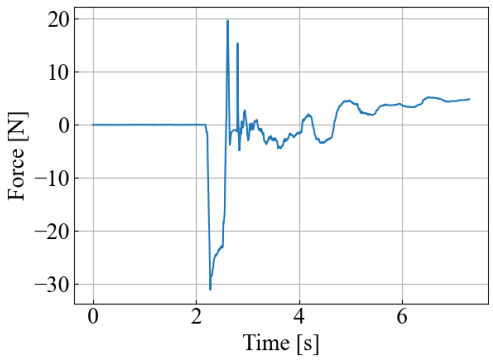
４．２．６　作業速度が協調動作に与える影響

次に，ロボットの動作速度を変化させて実験をおこなった．ロボットの移動量は 200 mm の下降動作である．ロボット最大速度を 50 mm/s から 200 mm/s に変更した(図 4-14 (a))．錘の質量 m_w = 5.15 kg，D_0 = 3.0 kg/s，$f_s = f_d$ = 0.98 N の実験結果を図 4-14 (b)に示す．錘の質量 m_w = 5.15 kg，D_0 = 10.0 kg/s，$f_s = f_d$ = 0.98 N と錘の質量 m_w = 5.15 kg，D_0 = 3.0 kg/s，$f_s = f_d$ = 4.9 N の結果を図 4-14 (c),(d)に示す．



(a) Acceleration input without assistance　　(b) m_w = 5.15 kg，D_0 = 3.0 kg/s，$f_s = f_d$ = 0.98 N





(c) m_w = 5.15 kg, D_0 = 10.0 kg/s, $f_s = f_d$ = 0.98 N

(d) m_w = 5.15 kg, D_0 = 3.0 kg/s, $f_s = f_d$ = 4.9 N

Fig. 4-14 Relationship between operating speed and impedance.

図 4-14 から動作速度を大きくした場合，バランサの制御パラメータを変更しても協調動作がうまくいかないことがわかる．そこで，200 mm の移動量を 100 mm ずつに分割し動作をおこなった. 条件は錘の質量 m_w = 5.15 kg, D_0 = 3.0 kg/s, $f_s = f_d$ = 0.98 N である．その結果を図 4-15 に示す．ここで，グラフの縦軸(Force)はロボットエンドエフェクタに生じる力を計測しているものである．

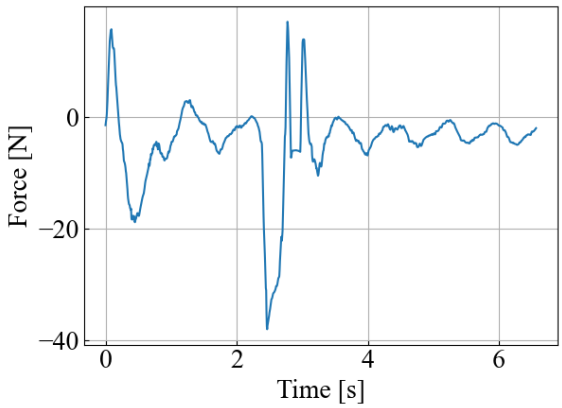


Fig. 4-15 Cooperative behavior by dividing the movement amount.

このとき，協調動作は成功した．これは，協調時の振動を動作途中で 1 度抑えられるためである. 以上から，搬送物の質量を大きくしたい場合はバランサの粘性力と摩擦力を大きくする必要がある. また，搬送速度を大きくしたい場合は，ロボットの移動量を分割する必要があることがわかった．この指針に従うことで協働ロボットとバランサのようなアシスト装置の協調動作が実現し得るといえる.

４．３　ロボット-アシスト装置系によるミュージカルソーの大変形

４．３．１　弾性力による外乱を付加したシステム

図 4-6 のシステムに弾性力による外乱を付加したモデルの安定性を考察する（図 4-16）．図 4-16 において k_m はばね定数であり，移動量に応じて弾性力の外乱が生じる．この外乱は，バランサが力の信号を検出するまえに入力される．以下では，図 2-3 で示したミュージカルソーのばね定数を k_m = 34.6 N/m とする．

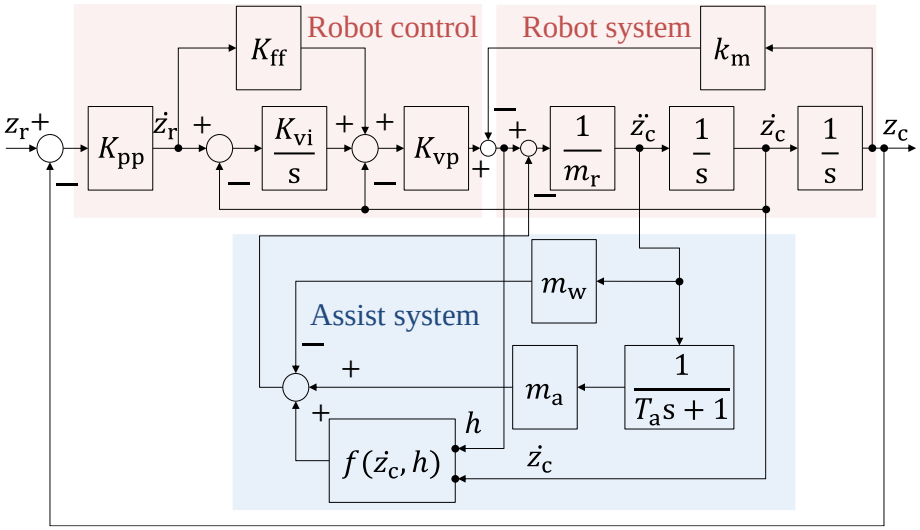
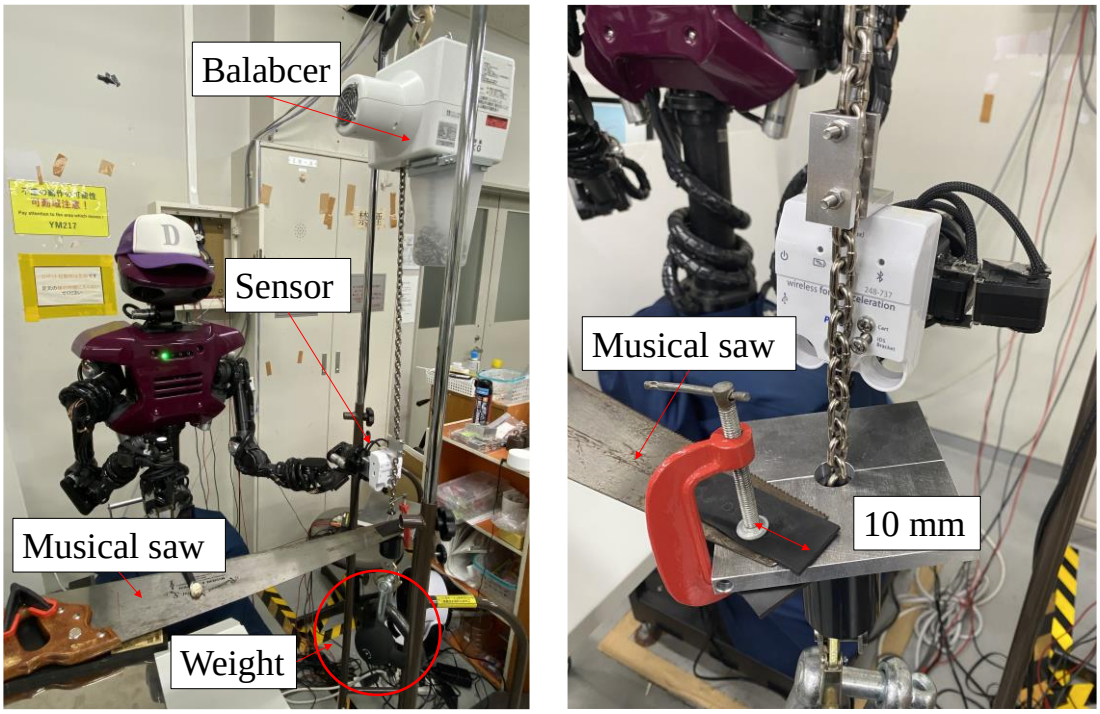


Fig. 4-16 Block diagram of the robot and assist coordination system with added disturbance by elastic force.

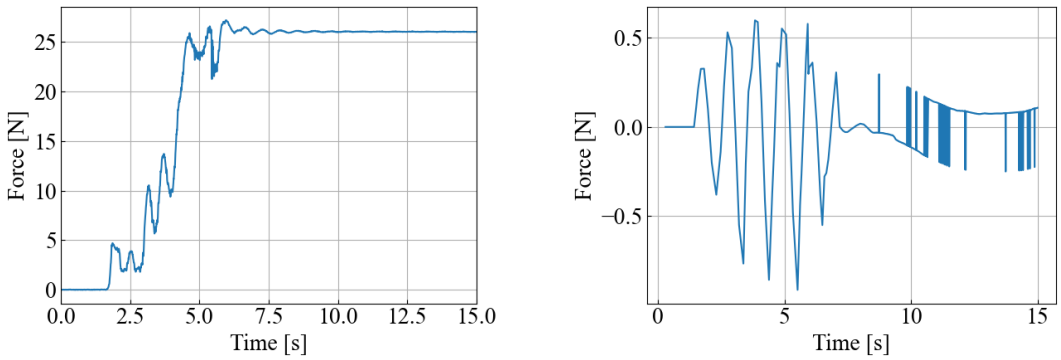
ミュージカルソーに初期変位 300 mm を与えた状態で，バランサに負荷荷重を記憶させる．ここでは，ミュージカルソー変位 300 mm による復元力が発生するため，バランサは錘の質量を実際よりも小さいものとして記憶する．実験の様子を図 4-17 に示す．錘の質量 m_w = 8.92 kg，D_0 = 3.0 kg/s，$f_s = f_d$ = 0.98 N 条件下での実験結果とシミュレーションを図 4-18 に示す．動作方向は上昇動作とする．ロボットは最大でおよそ 50 mm/s，加減速の加速度の大きさが一定 150 mm/s^2 となる台形速度制御とした．ここで，グラフの縦軸(Force)はロボットエンドエフェクタに生じる力を計測しているものである．



(a) Experiments with robots, balancers, and musical saw

(b) fixed condition

Fig.4-17 Collaborative experiment.



(a) Experiment

(b) Simulation

Fig. 4-18 Assisted cooperative behavior between robot and balancer with added disturbance due to elastic force.

この実験は，図 4-9(b)に弾性力による外乱を加えたものであり，この外乱により動作が安定することがわかった．図 4-18(a)で動作終了時にロボットエンドエフェクタに 25 N 程度の力が残留する理由について考察する．これはプリロード(余荷重)でバランサが記憶しているのは錘の質量 m_w (8.92 kg) にミュージカルソ

ーの初期変位 300 mm の z_a 正方向の復元力を差し引いたものである．よって，後述の式(4-9)，(4-10)で議論するように $k_m(\delta_0-\delta')$の残留力が生じる．ここでは，k_m = 36.4 N/m，δ_0 = 300 mm，δ' = 200 mm であるため 3.64 N の残留力が生じる．これは，錘の質量 m_w(8.92 kg)による荷重のおよそ 4 %である．ここで，図 4-18(a)での 25 N と残留力の計算値 3.64 N との差の原因としてセンサが傾いていることなどが考えられる．モデルではこのオフセットが生じないのは位置決め制御により，ロボットの制御対象に入る推力を零にする制御となっているためと考えられる．

４．３．２　アシストを応用したプリロードありで，大変形したミュージカルソーの高音域の発音

ミュージカルソーにバランサにより初期変位を与えることでロボットだけでは不可能であった曲げ量を実現できる．図 4-19 のようにミュージカルソーに初期変位 δ_0 を与える．

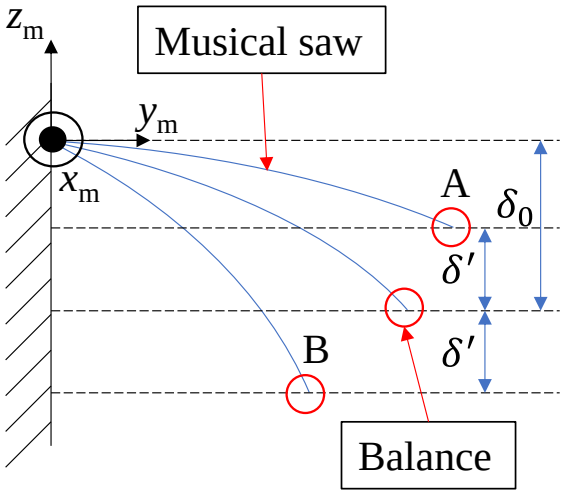


Fig. 4-19 Large deformation of musical saw.

このとき，吊るしている錘 m_w とミュージカルソーの弾性力 $k_m\delta_0$ とバランサのアシスト力 f_a のつり合いは式(4-9)のようになる．状態 A のとき，合力は式(4-10)のようになる．

$$f_a + k_m\delta_0 - m_w g = 0 \tag{4-9}$$

$$f_a + k_m(\delta_0 - \delta') - m_w g \tag{4-10}$$

式(4-10)に式(4-9)を代入することで合力は-k_m δ'となる．$\delta_0 \geq 2\delta'$を満たすとき，バランサがない状態での弾性力 k_m (δ_0-δ')よりも小さな力で動作が可能である．Bにおいても同様のことがいえる．

また，Hiro がミュージカルソーの演奏動作を遂行するとき，右手による打撃動作と左手による曲率操作（z_m 方向）をおこなう必要がある．ここで右手の打撃動作には，図 4-20 に示す弾性ばち[4.11)]を用いて，インプットシェービング法[4.12)]と組み合わせた. この双腕の協調動作を遂行するとき, 図 4-21 に示すように Hiro とミュージカルソーの配置による拘束条件から曲げ量は最大で 200 mm である．これをバランサと協調することで，，図 4-22 に示すように v_m = 300 mm の初期変位をミュージカルソーに与え，その初期位置から z_m 上下方向に 100 mm 動作させることでミュージカルソーに 200 mm から 400 mm の曲げ変位量を与えることができる．Hiro，バランサとミュージカルソーの配置は図 4-17 のとおりである．図 4-17(b)での固定位置はミュージカルソーの端から 10 mm の位置である．錘の質量 m_w = 5.15 kg，D_0 = 3.0 kg/s，f_s = f_d = 0.98 N の条件で演奏制御をおこなった．楽曲は“ジングル・ベル”である．BPM は 26.4 とした．図 4-23 は動作中の力センサの値であり，図 4-24 はミュージカルソー発音の周波数解析の結果である. ただし, 打撃位置はミュージカルソーの創面に沿うよう以下の式で制御している．

$$z_r = \frac{3z_l}{L_m}\left(\frac{{y_r}^3}{6} - \frac{{y_r}^2}{2}\right) \tag{4-11}$$

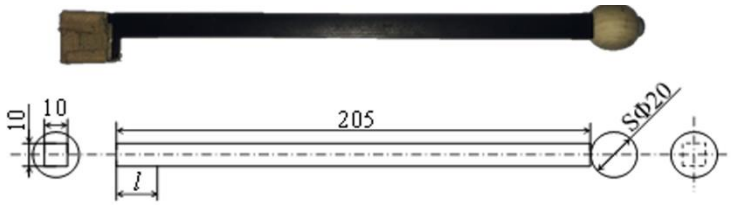


Fig. 4-20 Flexible rubber stick.

図 4-23 より，時刻 t = 12 s あたりで大きな振動力が発生するのはロボットエンドエフェクタがミュージカルソー曲率操作のため，ここでは音階を 1244 Hz から 1469 Hz に高くするため曲率を大きくする操作(エンドエフェクタを下降)をするためと考えられる．その直後も 1469 Hz から 987 Hz に音階を低くするため曲率を小さくする操作(エンドエフェクタを上昇)をするためと考えられる．したがって周波数の変化が大きな時刻で振動力が発生しているといえる．ロボットとバランサの協調動作は連続動作においても可能であることを示せた.

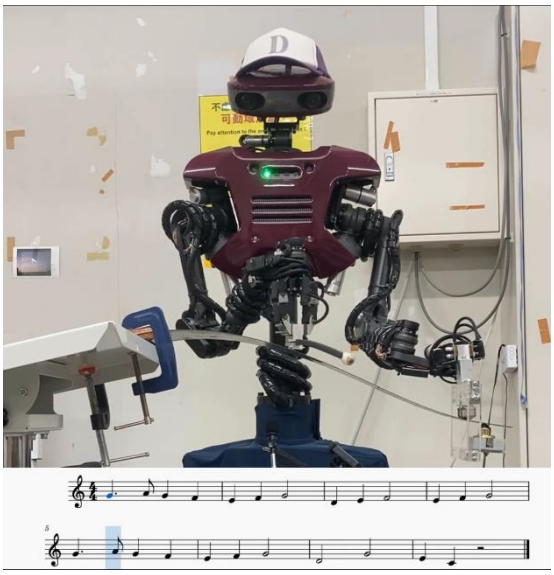
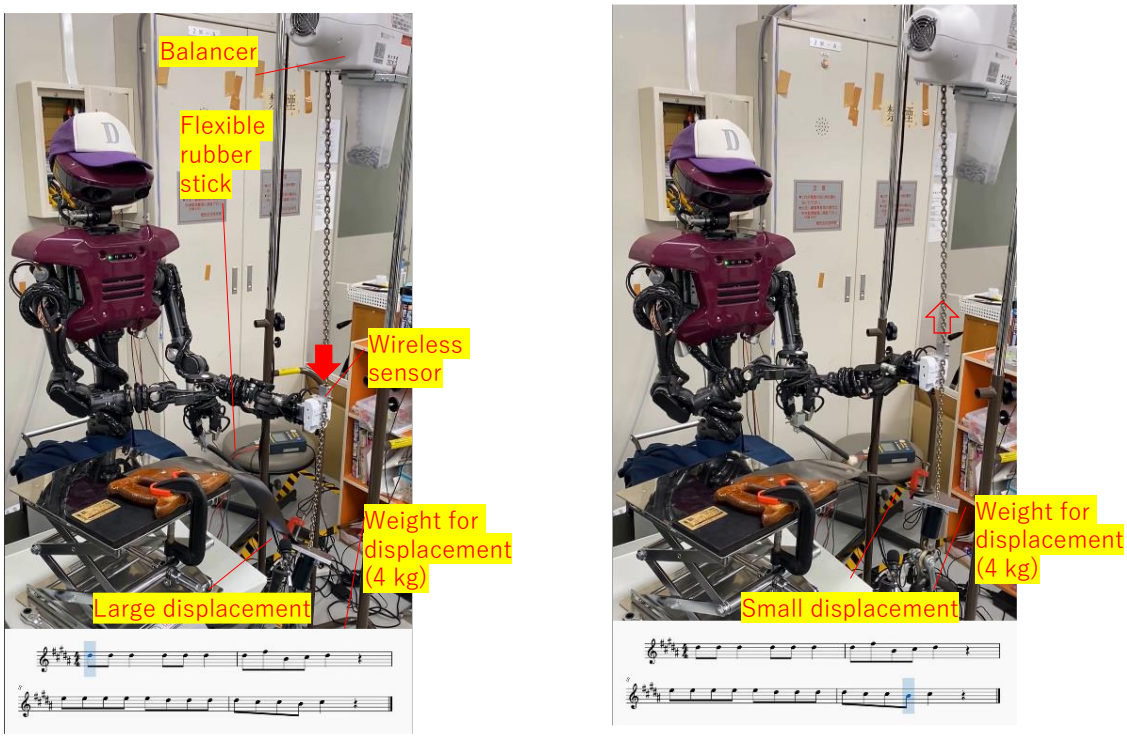


Fig. 4-21 Displacement on musical saw without assist system.



(a) Large displacement with weight (b) Small displacement with balancer

Fig. 4-22 Large displacement on musical saw without assist system.

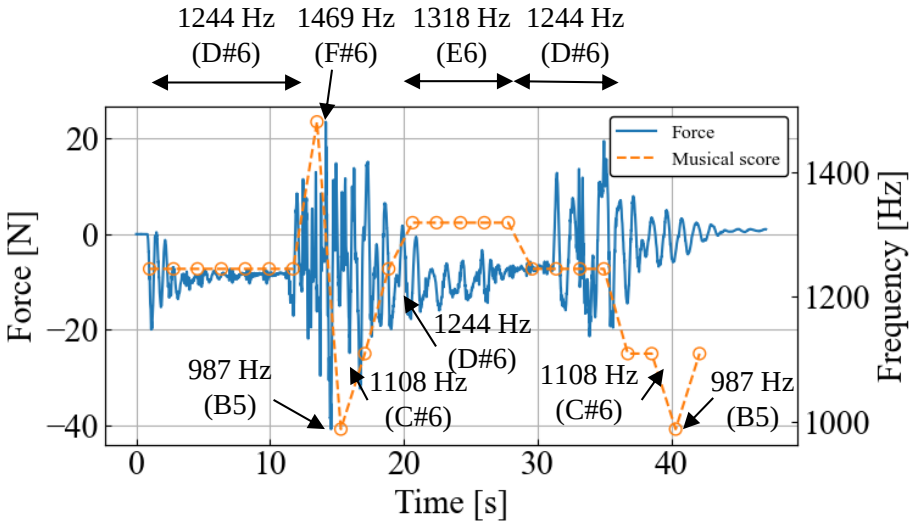


Fig. 4-23 Load force during performance control.

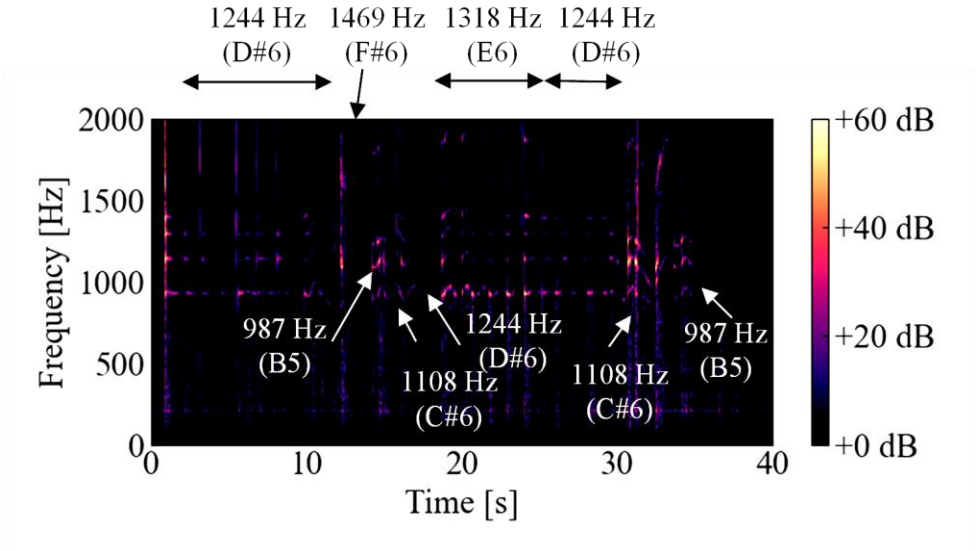
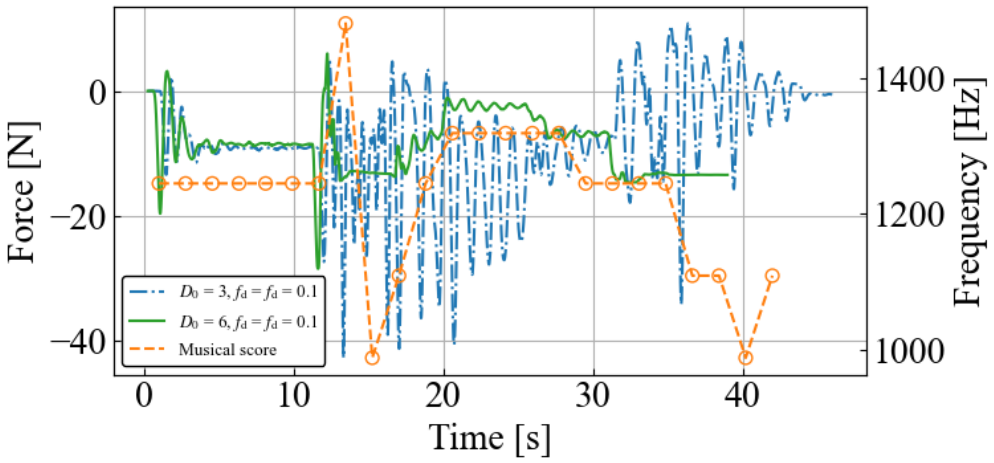


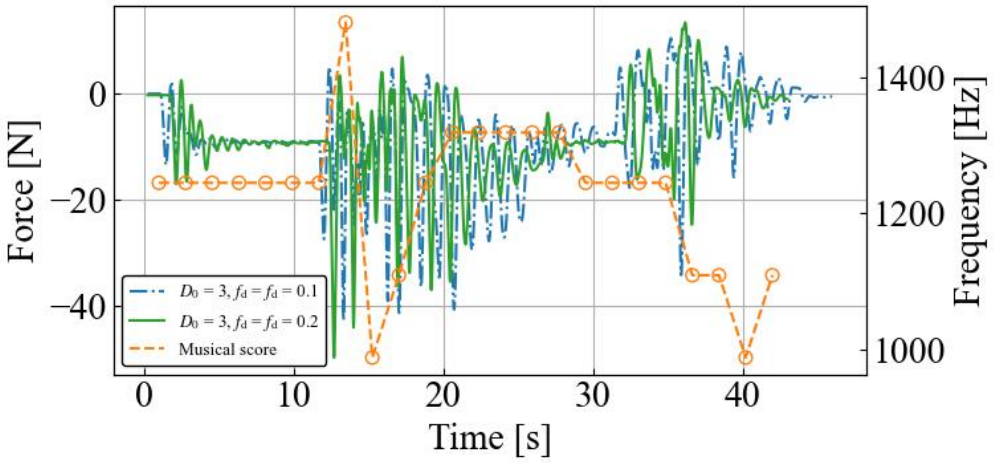
Fig. 4-24 Frequency analysis of sound generated during performance control.

図 4-24 において, 発音の周波数域は曲げ量 v_m = 200 mm において 987 Hz(B5), v_m = 400 mm において 1479 Hz(F#6)であることがわかる．ロボットのみのシステムでは，523 Hz(C5)から 1046 Hz(C6)の音域であったことから比較すると，高音域に音域を移動できていることがわかる．バランサの粘性係数 D_0，摩擦力 f_s，f_d の設定を図 4-18 の値の 2 倍にして実験をおこなった．その結果を図 4-25 に示す．図 4-25(a)は粘性係数 D_0 を 6 kg/s にした結果である．時刻 15 s あたりでバランサのチェーンがたわみ以後協調することなく動作した．図 4-25(b)は摩擦力を 1.96 N にしたときの結果である．これと摩擦力 0.98 N を比較すると，摩擦力を大きくした条件での発生力のほうが小さくなった．このことから，ミュージカル

ソー演奏制御のような連続動作では粘性係数 D_0 は小さい方がよく，摩擦力を大きくするとエンドエフェクタに発生する力は小さくなることがわかる．発音に関してはどの場合においても目標周波数との差に大きな差はなかった．
以上から，ロボットとバランサの協調システムで片腕の可搬を超える大変形域の曲率操作が可能であること，連続動作の可能性を示すことができた．また，動作の成否にバランサの粘性係数 D_0，摩擦力 f_s，f_d が影響することがわかった．



(a) Effect of viscosity coefficient.



(b) Effect of frictional force.
Fig. 4-25 Effect of viscosity coefficient and frictional force.

４．３．３　ロボット-アシスト系の周波数応答

さて, 4.3.2 項でプリロードを利用したミュージカルソー演奏制御を検討した. そこで連続した協調動作ではステップ応答をみるだけでなく周波数応答の検討も必要であることがわかった．周波数応答をみるにあたり，ロボット-アシスト系が摩擦力 f_s, f_d および操作力 h に依存する可変粘性係数 $D(h)$を含む非線形システムであるため応答の振幅依存性を考慮する必要がある. よって, 角振動数 ω と振幅 r による周波数応答を調べる．錘の質量 m_w = 5.15 kg，バランサが発生させる最大静止/動摩擦力 $f_s = f_d$ = 0.98 N，操作力に依存する速度粘性係数 D_0 = 3 kg/s としてロボットとバランサの協調実験をおこなった．ロボットは振幅 r [mm]と角振動数 ω [rad/s]を入力する．ある振幅 r における角振動数 ω で入力をおこない，バランサの脱落検知もしくはロボットの過負荷による停止で協調が失敗したときその条件での実験を終了した．20 周期の周期入力を入力した．図 4-26 に角振動数 ω [rad/s]と振動力の最大値 F_s [N]の関係を示す．図 4-27 に加速度 $r\omega^2$ [mm/s]と F_s の関係を示した．横軸は基底 10 の対数表示である．図 4-28(a)，(b) は振幅 r と協調動作が実現する角振動数，速度，加速度の臨界値，協調臨界角振動数 ω_c [rad/s]，協調臨界速度 $r\omega_c$ [mm/s]，また協調臨界加速度 $r\omega_c^2$ [mm/s^2]との関係を示したものである．図 4-26 から振幅 r = 2.5 mm でのみ振動力の共振曲線が得られた. その共振角振動数 ω_0 はおよそ 10 rad/s であった. r = 5.0, 7.5, 12.5, 25 mm では角振動数 ω の増加に伴い F_s は増加したが極値を探索するまえに協調が失敗する角振動数 ω に達した．振幅 r = 20 mm のとき極値がみられた．その極値を r = 20 mm における共振点とするとそのときの共振角振動数 ω_0 はおよそ 4 rad/s であり r = 2.5 mm のときの値と異なる．これによりこの系は振幅 r に依存する共振曲線をもち非線形性を有するといえる．実際に粘性係数と摩擦力を非線形な記述でモデル化しており，この周波数応答の結果を鑑みても妥当性を検証できた.

図 4-27 により，協調臨界加速度 $r\omega^2$ は 100 ~ 1000 mm/s^2 の区間に存在することがわかる．また最大力 F_s と加速度 $r\omega^2$ の関係は，加速度 $r\omega^2$ が 100 mm/s^2 付近までどの振幅 r でも同様の曲線上にあることがわかる. 振幅 r による協調臨界を表した図 4-28(a)より協調臨界角振動数 ω_c は振幅 r に対して減少傾向がみられることがわかった．図 4-28(b)より協調臨界速度 $r\omega_c$ はなだらかな増加傾向がみられる．図 4-28(c)より協調臨界加速度 $r\omega_c^2$ は振幅 r に対して対数的な増加傾向がみられる．図 4-28 のプロット点より下側の条件で協調をおこなう必要がある.

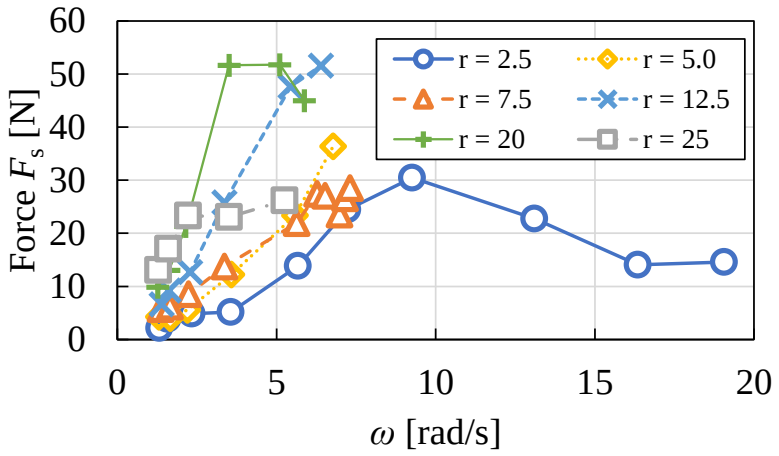


Fig 4-26 Frequency response from vibration force measurement.

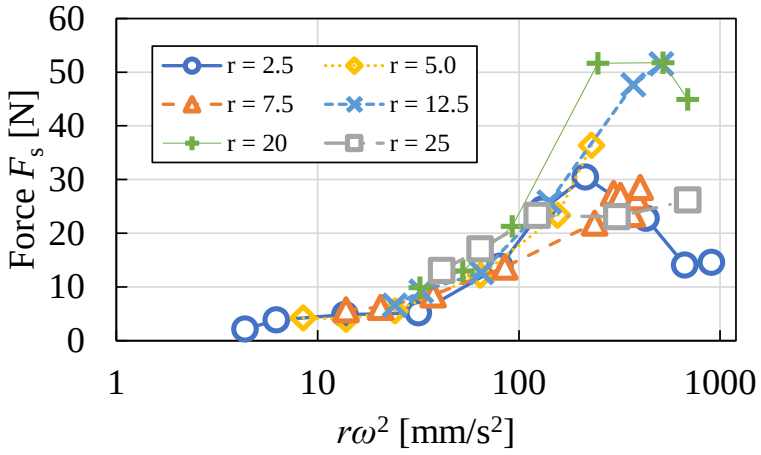
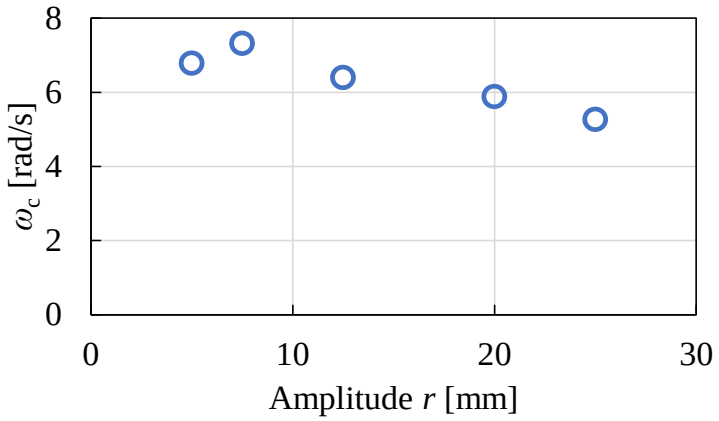
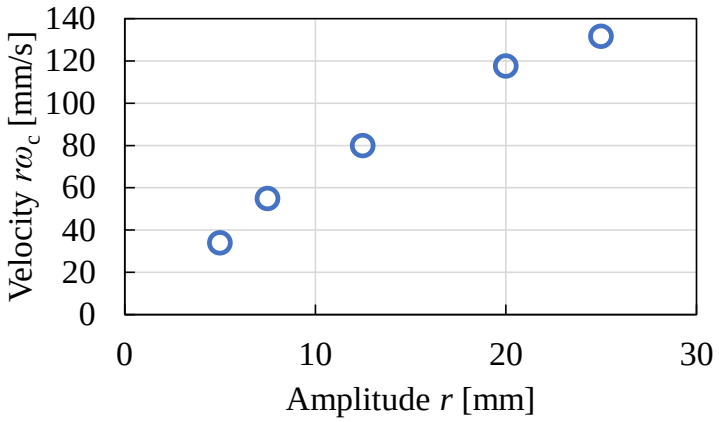


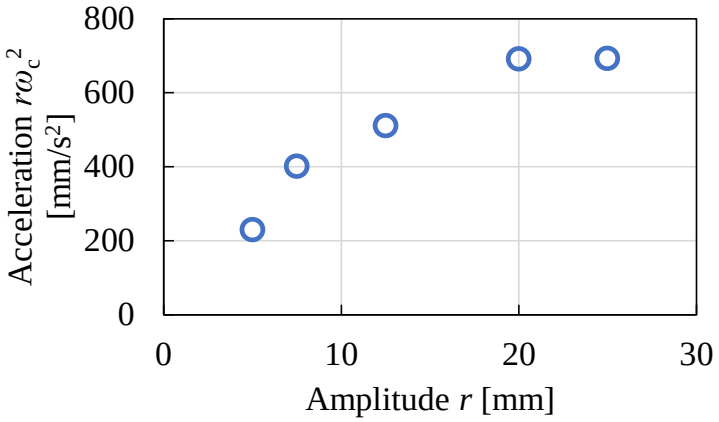
Fig 4-27 Frequency Response with Acceleration.



(a) Critical angular frequency



(b) Critical velocity



(c) Critical acceleration

Fig. 4-28 Influence of the amplitude of the coordination limit.

４．４　結　　言

本章は協働ロボットとアシスト装置による片腕の可搬を超える域における自律分散型の協調動作の基礎的な研究を行い，そのモデル化を行った．また，応用作業例として大変形の曲げ制御を試みた．以下にその結果をまとめる．

(1) 協働ロボットとアシスト装置による自律分散型の協調制御において，搬送物の質量を大きくする場合は，アシスト装置の粘性力と摩擦力を大きくする．搬送速度を大きくする場合は，ロボットの移動量を分割して制御することで動作を実現できることがわかった．

(2) ロボットの位置決め制御系にアシスト系を力の外乱として入力する，比較的簡単なモデルで動作の波形は満足に再現できなった．しかしその安定性の点で成否を判定できることがわかった．そのとき，搬送物の質量による慣性力が動作の成否に大きく影響ことも判明した．

(3) 応用作業例として，プリロードを加えて大変形の曲げ制御をおこない，従来にない高音域でのミュージカルソー演奏制御が実現できることがわかった．

参考文献

4.1) 加藤寛之，池浦良淳，野口真平，水谷一樹，中村久，本田朋寛，接触抵抗を考慮した産業用パワーアシスト装置のインピーダンス制御，日本機械学会論文集(C 編)，Vol.72，No.714，pp.214-221，2006.

4.2) 池浦良淳，人間とロボットによる協調作業，システム制御情報学会誌，Vol.44，No.12，pp.682-687，2000.

4.3) 花井宏旭，中川正夫，廣垣俊樹，青山栄一，超可搬作業を実現する協働型ヒューマノイドロボットとアシスト装置の自律協調モデル同定とその応用，日本機械学会論文集（投稿中）

4.4) Hiroaki Hanai, Atsuyuki Miura, Toshiki Hirogaki, Eiichi Aoyama, Advanced Musical Saw Manipulation by an Industrial Cooperative Humanoid Robot with Passive Sound Feedback, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.35, No.3 (2023), pp.711-722.

4.5) Hiroaki Hanai, Mikio Ozawa, Toshiki Hirogaki, Eiichi Aoyama, Consideration of Autonomous Decentralized Coordination of Electric Balancer and Robotic Arm With Inertia Compensation for Larger Payload Manipulation, 19th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, DETC2023-11516, pp.1-9.

4.6) 稲葉毅，松尾芳樹，手動制御系における操作者の開ループ成型特性の解析と操作性を考慮した補償器設計，人間工学，Vol.33，No.3，pp.131-140，1997.

4.7) 奥田栄一郎，瀧川益生，中川亨，電動式パワーステアリングのモデリングと

制御，日本機械学会論文集(C 編)，Vol.56，No.527，pp.168-173，1990.
4.8) 松原厚，精密位置決め・送り系設計のための制御工学，森北出版株式会社，pp.71-88，2008.
4.9) 竹下虎男，風間務，可知光康，CNC サーボシステムの性能向上に関する研究（NC サーボ追従性改善の一方法），日本機械学会論文集　(C 編)，Vol.63，No.615，pp.174-179，1997.
4.10) D. Karnopp，Computer simulation of stick-slip friction in mechanical dynamic systems，Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control，Vol.107，pp.100-103，1990.
4.11) 廣垣俊樹，青山栄一，福家祐輔，三島明，三浦諄之，産業用ヒューマノイドロボットによる打撃音フィードバックを用いたミュージカルソーのチューニング制御の考察，日本機械学会論文，Vol.87, No.898 (2021), p. 20-00293.
4.12) 廣垣俊樹，青山栄一，杉浦義久，小林飛翔，産業用ヒューマノイドロボットを用いた打撃動作と打撃音フィードバックに基づく応用の考察，日本機械学会論文，Vol.83, No.855 (2017), p.17-00132.

第５章　協働型双腕スカラロボットのグラスプレスハンドリング評価に向けた４元数を用いた無線モニタリング

５．１　緒　　言

前章では，第２章，第３章を受け，協働ロボットとアシスト装置による片腕の可搬を超える域における自律分散型の協調動作の基礎的な研究を行い，そのモデル化を行うとともに，応用作業例として大変形の曲げ制御を試みた．そのうえで，人と協働ロボットの共存・協働を実現するにおいて，制御対象の状態を無線センサの活用により現場で容易に直接計測できることの有効性も明確になってきて，自動化技術のさらなる高度化への様々な方向への応用展開も期待できることが判明してきた．

一方で，制御対象の現場計測においては，視覚的なモニタリングがよく用いられるが，カメラには死角があるため，継続的なモニタリングは不可能であり，例えば工場における搬送工程などでは，搬送機器が多数のセンサを備えている監視方法がある．その場合，搬送工程が長ければ長いほど，より多くのセンサが必要になるが，どんなに多くのセンサを設置しても，効果的に監視できないポイントは必ず存在する．一方で，対象となる現象に近接した無線センシング技術を使って現象を監視しようとする研究もあり，これらの研究は開発コストを削減し，様々な形状に適応することで，限界を押し広げるものである．

そこで本章[5.1), 5.2)]では，3D プリンタを用いてターゲットの形状を再現し，ターゲットの軌跡や振動，外力を直接モニタリングする形状模倣型無線モニタリングシステムを提案する．ターゲット形状を模倣したモニタリング装置を形状模倣型無線モニタリングセンサと呼ぶ．形状模倣型無線モニタリングセンサの形状の複雑さは，環境の複雑さと同様にスケールすることができる．形状模倣型無線モニタリングロボットの形状と環境の両方が単純な場合，システムは数学的にモデル化できる．このモデルに基づいて，形状模倣型無線モニタリングセンサの軌道を計算することができる．一般に，姿勢表現にはジンバルロックと呼ばれる特異点がある．この問題に対処するために，微小クォータニオン法を用いることを提案する．また，自動化技術において，対象を直接把持して移動するのではなく，プレートの運動に起因する慣性力を用いて移動するグラスプレスハンドリングの手法の応用展開が期待されており，多関節産業用ロボットにおいてその技術が具現化されてきている[5.3)]．本章では，双腕スカラロボットによるボールのグラスプレスハンドリングをケーススタディとして，本手法の有用性を検証する．

５．２　グラスプレスハンドリング

グラスプレスハンドリングとは，制御対象に直接接触することなく，慣性または傾きによって対象を操作する手法である．本研究では，プレート上のボール操作のためのグラスプレスハンドリング技術として，双腕型スカラロボットを用いた．両腕スカラロボットは，川崎重工業株式会社製の duAro シリーズで，変更可能の剛性と高精度で知られ，業界で最も広く使用されているロボットの一つである [5.4) ~ 5.6)]．ロボットは両腕でプレートを把持し，閉リンク機構を介してボールを操作する．図 5-1 はプレートを把持する両腕スカラロボットを示している．本研究では，プレート操作を水平方向（図 5-1 の x_p-y_p 平面）で行った．

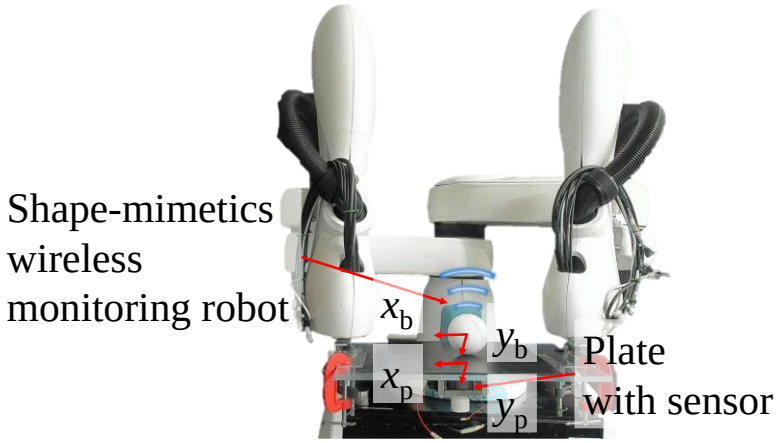


Fig. 5-1 Grasp-less handling by a dual-arm SCARA robot.

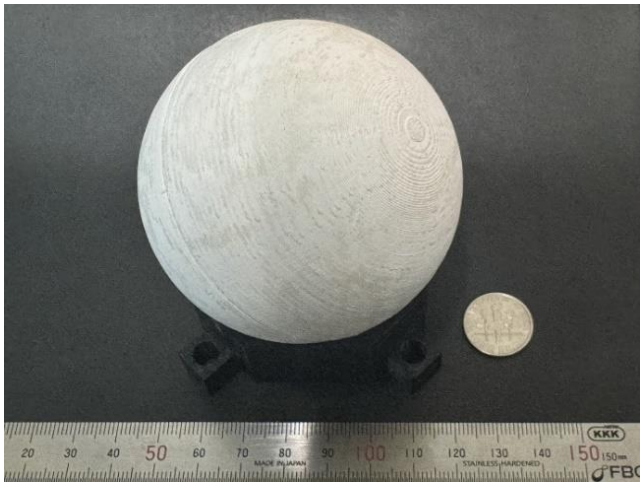
双腕スカラロボットは，マスター・スレーブ方式で制御され，スレーブアームはマスターアームの動きに追従するようにプログラムされた．形状模倣無線モニタリングセンサ，プレート上の無線センサは Bluetooth 通信，カメラは USB 接続で同期され，モニタリングには Pasco ソフトウェアが使用された．形状模倣無線モニタリングセンサ，プレート上の無線センサともに Pasco 製 6 軸 IMU，PS-3223 で加速度と角速度を計測する．プレートの動き（入力）とボールの挙動（出力）の関係を確立するため，プレートとボールの両方にセンサを取り付けた．

５．３　無線モニタリングシステムによる軌道推定

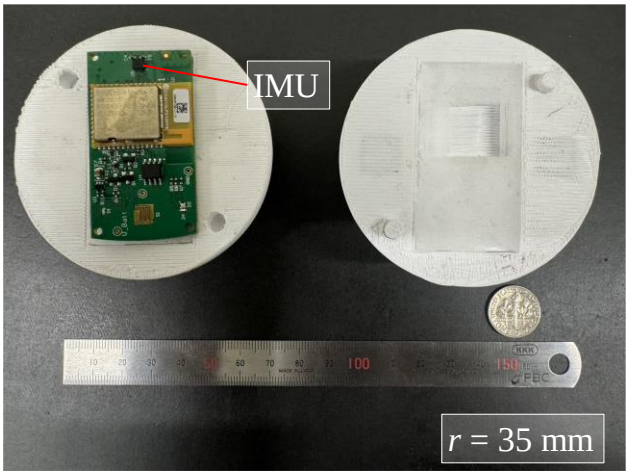
５．３．１　無線モニタリングシステム

本システムは，3D プリントされた模型と無線センサ（PS-3223, Pasco 社製の基板）からなる．図 5-2 は，対象物の形状を模倣した形状模倣型無線モニタリングシステムである．このシステムは，対象物の軌跡，振動，外力をリアルタイム

でモニターするために使用する．軌跡，振動，外力は 6 軸 IMU 加速度，角速度から算出する．形状模倣型無線モニタリングセンサの最も単純な構成は，図 5-2(a)，(b)に示す球形に代表されるように，点対称の場合に実現される．センサ外形形状が球形で，その環境が比較的単純な場合，軌道計算のアルゴリズムは簡単に適用できる．



(a) Ball shape



(b) Half-split ball shape.

Fig. 5-2 Ball shaped wireless monitoring sensor

５．３．２　水平面玉転がしモデル

双腕スカラロボットの左右手先間距離 d_p は 400mm．ロボットはアクリル板を把持し，ボールと板の間には摩擦を高めるためにゴム板を配置した．双腕スカラロボットは，指令半径 r_c を 60 mm として，指定した 9 点で円運動を実行するようにプログラムした．形状模倣型無線モニタリングセンサのサンプリング周波数は f_s=100Hz である．プレート操作は，プレート座標系 Σp の z 軸周りの負方向

に，操作周波数 f_m は 0.91Hz で行った．すなわち動作 1 周期は 1.1 s 程である．

水平面プレート上のボールの運動モデルを図 5-3 のように定義する．ボール半径 r，質量 m，慣性モーメント $I = 2/5mr^2$ とする．ここで，地上からみたボール重心の座標 Σb を x_b，y_b，地上からみたプレートの座標系 Σp を x_p，y_p とする．ボール座標 y_b 軸回り回転角度を φ，ボール座標 x_b 軸回り回転角度を θ とする．プレートとボールの接触点に生じる静止摩擦力を f とする．ボール運動における速度粘性係数を D とする．転がり摩擦トルクを N とする．

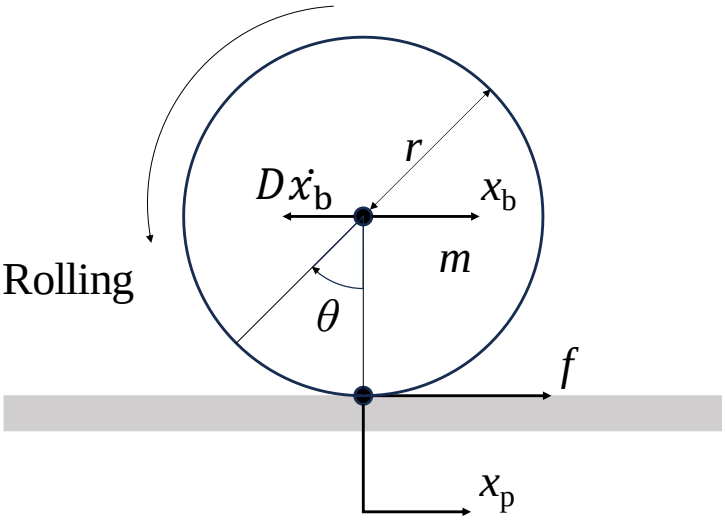


Fig. 5-3 Model of a ball on a plate.

図 5-3 におけるボール重心の並進方向の運動方程式は式(5-1)で表現できる．回転の運動方程式は式(5-2)である．ただし，角速度 ω によって分岐をおこなう．角速度 ω が十分小さく 0 に近似できる領域を考える．このとき，転がり摩擦トルク N が回転の運動において支配的となる．よって，ボールはプレートに対して静止し，相対運動は生じない．したがって，位相差 β も生じない．一方，角速度 ω がある値を超えると，転がり摩擦トルク N は静止摩擦力 f が生じさせるトルク rf に比して十分小さく無視できる．このシステムを線形化するため，地上からみたボール運動にすべりが生じないとすると式(5-3)なる拘束条件を得る．式(5-1)～(5-3)より，式(5-4)なるボールの運動方程式を得る．座標系 Σb と Σp の相対差 $(x_b - x_p,\ y_p - y_b)$ がプレート上のボールの位置となる．

図 5-4 は，プレート X_p からボール X_b への伝達関数を周波数領域で示したものである．ここで，（$x_b - x_p$）はプレートからみたボールの相対運動である．図 5-4 において，操作角速度 $\omega_m = 2\pi f_m$ が D に比べて十分に大きいとき，相対座標系 Σb-p における r_b-r_c／r_c は，ボールの円運動半径を r_b とすると，式（5-5）で表される．したがって，操作角速度 $\omega_m = 2\pi f_m = 5.7$rad/s のとき，相対座標系 Σb-p に

おける円運動半径 r_b - r_c は，式(5-5)より約 42.8mm となる [5.11)].

$$m\ddot{x_b} = f - D\dot{x_b} \tag{5-1}$$

$$\begin{cases} I\ddot{\theta} = -rf + N, & \omega \approx 0 \\ I\ddot{\theta} = -rf, \text{otherwise} \end{cases} \tag{5-2}$$

$$x_b - x_p = r\theta \tag{5-3}$$

$$\frac{7}{5}m\ddot{x_b} = \frac{2}{5}m\ddot{x_p} - D\dot{x_b} \tag{5-4}$$

$$\left|\frac{r_b - r_c}{r_c}\right| = \left|\frac{X_b - X_p}{X_p}\right| \cong \frac{5}{7} \tag{5-5}$$

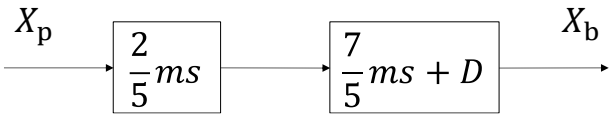


Fig. 5-4 Plate – ball transfer function.

５．３．３　水平面玉転がしのボード線図

式(5-4)をラプラス変換することで，式(5-6)なるプレート X_p からボール X_b への伝達関数 $G_{pb}(s)$を得る．

$$G_{pb}(s) = \frac{\frac{2}{5}ms}{\frac{7}{5}ms + D} \tag{5-6}$$

プレート座標 Σp に式(5-7)なる入力を与えたとき，ボール座標 Σb へ式(5-8)でプレート運動が伝達される．プレート円運動半径 r_p，ボール円運動半径 r_b，プレート位相 α，ボール位相 α’とする．ここで，プレート入力に対するプレート座標 Σp からみたボール座標 Σb への伝達関数 $G_{ppb}(s)$は式(5-9)となる．式(5-9)を整理すると式(5-10)を得る．式(5-10)から図 5-5 なる伝達関数を得る．$s = j\omega$ で式(5-10)なる伝達関数 $G_{ppb}(j\omega)$のゲイン$|G_{ppb}(\omega)|$を式(5-11)で得る．

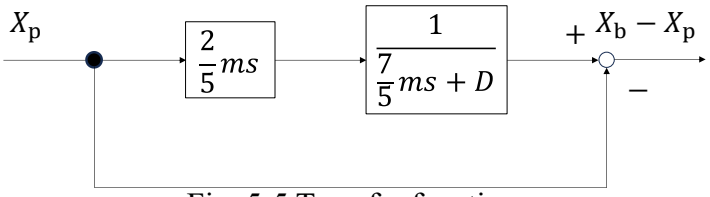


Fig. 5-5 Transfer function.

$$x_\mathrm{p} = r_\mathrm{p}\cos(\omega t + \alpha) \tag{5-7}$$

$$x_\mathrm{b} = r_\mathrm{b}\cos(\omega t + \alpha') \tag{5-8}$$

$$G_\mathrm{ppb}(s) = \frac{G_\mathrm{pb}X_\mathrm{p} - X_\mathrm{p}}{X_\mathrm{p}} = \frac{\frac{2}{5}ms}{\frac{7}{5}ms + D} - 1 \tag{5-9}$$

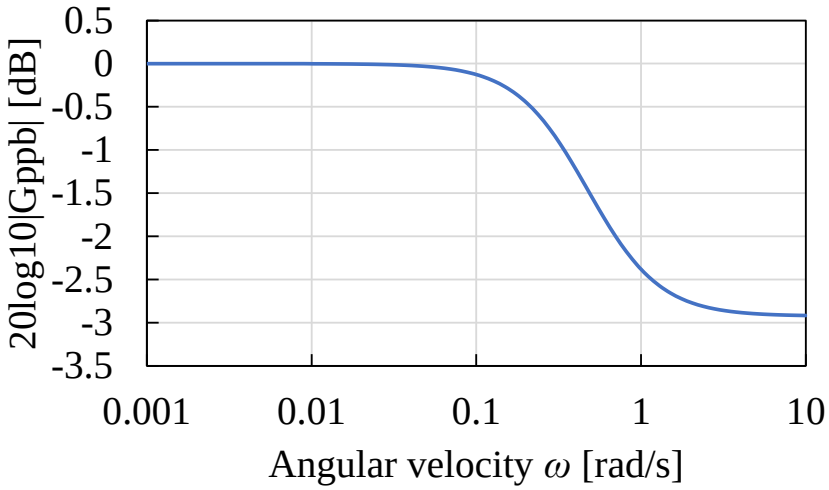
$$G_\mathrm{ppb}(s) = \frac{-ms - D}{\frac{7}{5}ms + D} \tag{5-10}$$

$$\left|G_\mathrm{ppb}(\omega)\right| = \sqrt{\frac{D^2 + m^2\omega^2}{D^2 + \left(\frac{7}{5}m\right)^2\omega^2}} \tag{5-11}$$

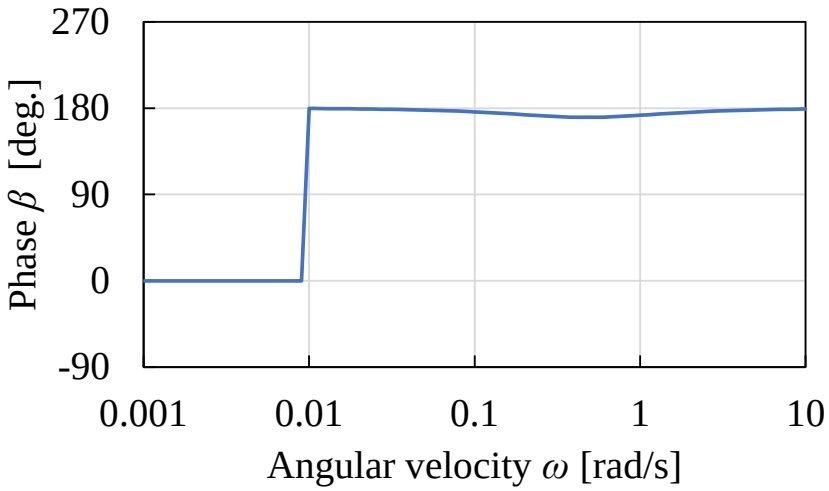
式(5-11)において，D << ω であれば，プレート入力に対するプレート座標 Σp からみたボール座標 Σb へのゲイン$|\,G_\mathrm{ppb}(\omega)\,| = |\,r_\mathrm{b} - r_\mathrm{p} / r_\mathrm{p}\,|$は式(5-12)と表現できる．位相 β は式(5-13)で得る．ここで，ボール質量 m = 178 g，速度粘性係数 D = 0.1 におけるプレート入力に対するプレート座標 Σp からみたボール座標 Σb へのボード線図を図 5-6 に示す．ゲイン線図なる図 5-6(a)より，角速度 ω が十分小さい領域では, 転がり摩擦トルク N が支配的であり, $20\log10|\,G_\mathrm{ppb}(\omega)\,|$は 0 である．よって, ボールはプレート上で相対運動をしない. 角速度 ω が大きい領域では, ゲイン$|\,G_\mathrm{ppb}(\omega)\,|$は 5 / 7 に収束することがわかる. 位相線図なる図 5-6(b)をみる. 位相差 β は角速度 ω が十分小さい領域で 0 となる. これは, ボールがすべらず, かつ転がらずプレートに対し静止していることを示す．角速度 ω が大きい領域では，プレート入力に対するプレート座標 Σp からみたボール座標 Σb への位相 β は，角速度 ω によらず逆位相で進むことがわかる．ここで逆位相で進むのは，式(5-10)なる伝達関数が負符号を有することによる．

$$\left|G_\mathrm{ppb}(\omega)\right| = \left|\frac{r_\mathrm{b} - r_\mathrm{p}}{r_\mathrm{p}}\right| \approx \frac{5}{7} \tag{5-12}$$

$$\beta = \angle G_{\mathrm{ppb}}(\omega) = \tan^{-1} \frac{\frac{2}{5} m\omega D}{-\frac{7}{5} m^2\omega^2 - D} \tag{5-13}$$



(a) Gain | $G_{\mathrm{ppb}}(\omega)$ |



(b) Phase β

Fig. 5-6 Bode plot.

５．３．４　従来手法における姿勢表現の課題

例えば，従来手法において，オイラー角によりセンサ座標系から慣性座標系に座標を変換することで方位を推定することができる．オイラー角は，航空機のナビゲーションや 3D グラフィックスなどのアプリケーションで一般的に使用され，変換のヤコビアン行列に逆三角関数を使用する．しかし，この方法は回転が小さく，特異点（ジンバルロックなど）が発生しない場合にのみ有効である．これは，多関節ロボットアームの運動学で遭遇する特異点と類似しており，オイラー角の使用は回転が小さい場合に限定される．

この関係を式（5-14）に示す．大きな回転時の不安定性を回避するために，本研究では後述するクォータニオン（4 元数）と呼ばれる数学的手法を用いる．しかし，クォータニオンで方位を表現するのは複雑で，慣性座標系での回転量を計算するにはオイラー角に変換し直す必要があり，やはり特異点が存在する可能性がある．この問題を解決するために，大きな回転変位に対しても，クォータニオンを直接用い，回転速度を拘束することで，特異点に遭遇することなく回転量を推定する方法を提案する．

$$\begin{bmatrix} d\varphi \\ d\theta \\ d\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\varphi\dfrac{\sin\theta}{\cos\theta} & \cos\varphi\dfrac{\sin\theta}{\cos\theta} \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi\dfrac{1}{\cos\theta} & \cos\varphi\dfrac{1}{\cos\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{i}\omega_x dt \\ {}^{i}\omega_y dt \\ {}^{i}\omega_z dt \end{bmatrix} \tag{5-14}$$

５．３．５　クォータニオン(4 元数)

クォータニオン $\boldsymbol{q}$ は, 式(5-15) に示すように, 複素数の虚数部を 3 つの軸 i, j, k に拡張したものである．クォータニオン $\boldsymbol{q}_i\,(i=0,\ 1,\ 2,\ 3)$ の各要素は実数であり，以下の議論では，その絶対値は 1 である．コンピュータ グラフィックスやロボット工学などの分野での応用に適しており, 3 次元での自由回転を効果的に記述できる．オイラー角とは異なり, クォータニオンを用いた方向表現には特異点がない．ただし，クォータニオンを用いた方向表現は，慣性座標系での回転を直接表現しないため, 解釈が難しい場合がある．クォータニオンをオイラー角に戻すと，不連続点や特異点が生じることがよくあり [5.8) ~ 5.11)]，クォータニオンからオイラー角 φ, θ, ψ への変換は，式 (5-16), (5-17), (5-18) で示される．これらの方程式には逆三角関数が含まれており，その範囲は [-π/2, π/2] に制限されているため，±π/2 で特異点が生じる．

図 5-7 は単位円表現を使用してこの現象を示しており，[-π/2, π/2] の範囲内で特異点が発生することを示している．この制限により，π/2 を超える回転量の表現が妨げられ，オイラー角に基づく従来の方向表現の基本的な問題である．

$$\boldsymbol{q} = q_0 + q_1 i + q_2 j + q_3 k \tag{5-15}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{2q_2q_3 + 2q_0q_1}{2{q_0}^2 - 1 + 2{q_3}^2} \tag{5-16}$$

$$\theta = \sin^{-1} 2q_0q_2 - 2q_1q_3 \tag{5-17}$$

$$\psi = \tan^{-1} \frac{2q_1q_2 + 2q_0q_3}{2{q_0}^2 - 1 + 2{q_1}^2} \tag{5-18}$$

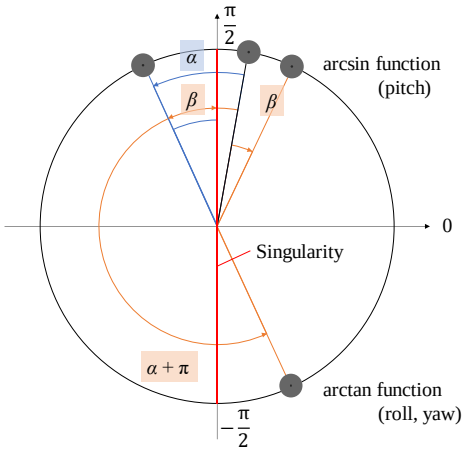


Fig. 5-7 Singularities.

５．３．６　クォータニオンを用いた姿勢推定

形状模倣無線監視ロボットによって測定された加速度ベクトルを ${}^{i}\boldsymbol{a} = [{}^{i}a_x\ {}^{i}a_y\ {}^{i}a_z]^T$，角速度ベクトルを ${}^{i}\boldsymbol{\omega} = [{}^{i}\omega_x\ {}^{i}\omega_y\ {}^{i}\omega_z]^T$ と表す．ここで，上付き文字 ^{i} はセンサ座標系を表す．グローバル座標系の加速度成分を$[0\ 0\ g]^T$ とすると，センサ座標系から慣性座標系への初期オイラー角は，${}^{i}\boldsymbol{a}$ を使用して式(5-19)および(5-20)に示すように表すことができる．ただし，初期 ψ はゼロと仮定する．初期クォータニオン $\boldsymbol{q}(0)$は, 初期オイラー角を使用して式(5-21)のように表される. これは, 式(5-22)の時間固有の角速度 ${}^{i}\boldsymbol{\omega}$ を使用して更新される．ここで，$\boldsymbol{I}_4$ は 4×4 の単位行列である．$\Omega({}^{i}\boldsymbol{\omega})$は(5-23)で表される．式(5-21)で得られたクォータニオンを式(5-16)，(5-17)，(5-18)を用いてオイラー角に変換することで，推定された方向から位置を推定する際に問題となる特異点における不連続な表現が得られた．

$$\varphi = \tan^{-1}\frac{{}^{i}a_y}{{}^{i}a_z} \tag{5-19}$$

$$\theta = \tan^{-1}\frac{-\,{}^{i}a_x}{\sqrt{{}^{i}a_y{}^{2} + {}^{i}a_z{}^{2}}} \tag{5-20}$$

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\frac{\psi}{2}\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{\varphi}{2} + \sin\frac{\psi}{2}\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{\varphi}{2} \\ \cos\frac{\psi}{2}\cos\frac{\theta}{2}\sin\frac{\varphi}{2} - \sin\frac{\psi}{2}\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\varphi}{2} \\ \cos\frac{\psi}{2}\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\varphi}{2} + \sin\frac{\psi}{2}\cos\frac{\theta}{2}\sin\frac{\varphi}{2} \\ \sin\frac{\psi}{2}\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{\varphi}{2} - \cos\frac{\psi}{2}\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{\varphi}{2} \end{bmatrix} \tag{5-21}$$

$$\boldsymbol{q}(t + \Delta t) = [\boldsymbol{I}_4 + \frac{1}{2}\boldsymbol{\Omega}({}^{i}\boldsymbol{\omega})\Delta t]\boldsymbol{q}(t) \tag{5-22}$$

$$\boldsymbol{\Omega}({}^{i}\boldsymbol{\omega}) = \begin{bmatrix} 0 & -\,{}^{i}\omega_x & -\,{}^{i}\omega_y & -\,{}^{i}\omega_z \\ {}^{i}\omega_x & 0 & {}^{i}\omega_z & -\,{}^{i}\omega_y \\ {}^{i}\omega_y & -\,{}^{i}\omega_z & 0 & {}^{i}\omega_x \\ {}^{i}\omega_z & {}^{i}\omega_y & -\,{}^{i}\omega_x & 0 \end{bmatrix} \tag{5-23}$$

５．３．７　微小クォータニオンを導入したアルゴリズム

式(5-16)，(5-17)，(5-18)に逆三角関数が含まれていると特異点が生じる可能性があるが，これらの関数の引数が小さい場合は，定義範囲[-π/2，π/2]内で計算でき，特異点は発生しない．クォータニオンの回転特性を利用すると，式(5-24)を使用して微小クォータニオン $\Delta\boldsymbol{q}(t)$を得ることができる．ここで，$\boldsymbol{q}(t)^{-1}$ は，$\boldsymbol{q}(t)^{-1}\boldsymbol{q}(t)=1$ を満たすクォータニオンの逆数を表し，特に回転時に単位クォータニオンを使用する場合，共役クォータニオン $\boldsymbol{q}(t)^{*}$と等価である．

式(5-16)，(5-17)，(5-18)の変換式をオイラー角に適用すると，慣性座標系での微小回転量 $\boldsymbol{\delta}=[\Delta\varphi\ \Delta\theta\ \Delta\psi]^{\mathrm{T}}$ を計算することができる．$\boldsymbol{\delta}$ が[-π/2, π/2]の範囲内にある限り，特異点は発生しない．平面上のボールの転がり運動の場合，式(5-25)に示すように，半径ベクトル $\boldsymbol{r}=[0\ 0\ r]$と $\boldsymbol{\delta}$ を外積で乗算すると，微小変位 $\Delta\boldsymbol{d}=[\Delta d_x\ \Delta d_y\ 0]$が得られる．この変位を積分することにより，平面上の自己位置を求めることができる．

このマイクロクォータニオンを用いたアルゴリズムを適用するための条件は，式(5-26)で定義される慣性座標系での短時間 Δt の回転量が δ_0 より小さくなければならないことである．ここで，無線センサのサンプリングレートは，$f_s=1/\Delta t$ で定義される．この条件を満たす範囲内であれば，式(5-16)，(5-17)，(5-18)の逆三角関数の領域制約による不連続性なく，クォータニオンをオイラー角に変換できる．図 5-8 に提案手法のブロック図を示す．

ただし，このシステムは 6 軸慣性計測ユニット(IMU)(3 軸加速度と 3 軸角速度)を想定しており，積分中にドリフトが発生する可能性がある．そのため，三角関数の定義領域が有限なため，連続的な軌道を保証するための制約が必要となる．

$$\Delta\boldsymbol{q}(t)=\boldsymbol{q}(t+\Delta t)\boldsymbol{q}(t)^{-1} \tag{5-24}$$

$$\boldsymbol{\Delta d}=\boldsymbol{\delta}\times\boldsymbol{r} \tag{5-25}$$

$$\delta_0=\frac{\pi}{2}f_s \tag{5-26}$$

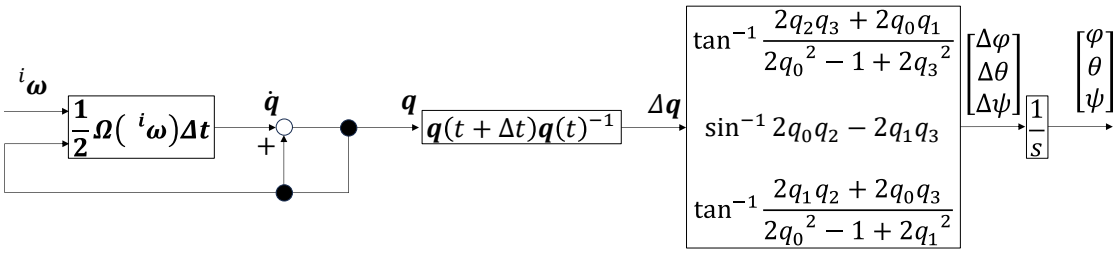
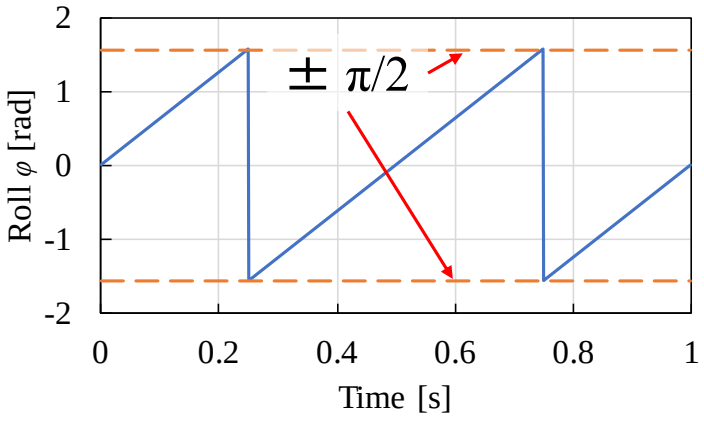
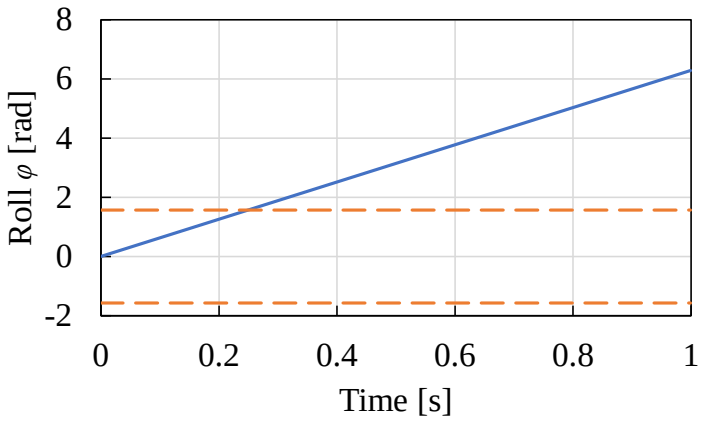


Fig.5-8　Orientation estimation using micro-quaternions.

図 5-9 と図 5-10 において，微小クォータニオンを使用した場合と使用しない場合の方向推定を比較した．入力信号は，各軸周りの角速度を 2π rad/s 一定とした．図 5-9(a)と 5-10(a)は，微小クォータニオンを組み込まない従来の方向推定方法で，[-π/2, π/2]で特異点が生じることを示している．一方，図 5-9(b)と 5-10(b)は，微小クォータニオンを使用すると，[-π/2,π/2] の臨界範囲を通過する場合でも，連続的な方向推定が可能になることを示している．

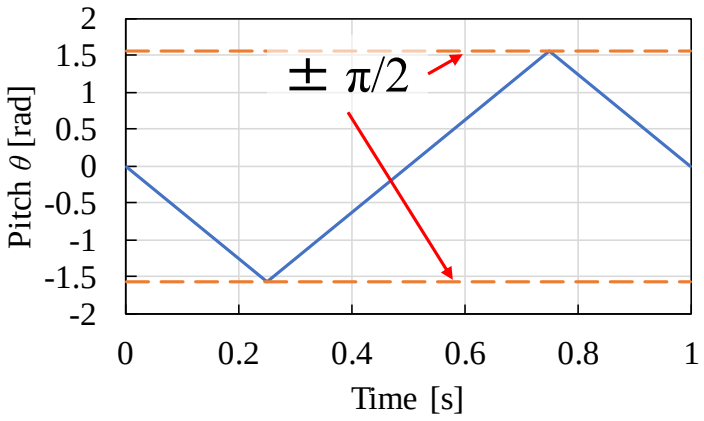


(a) w/ Quaternion

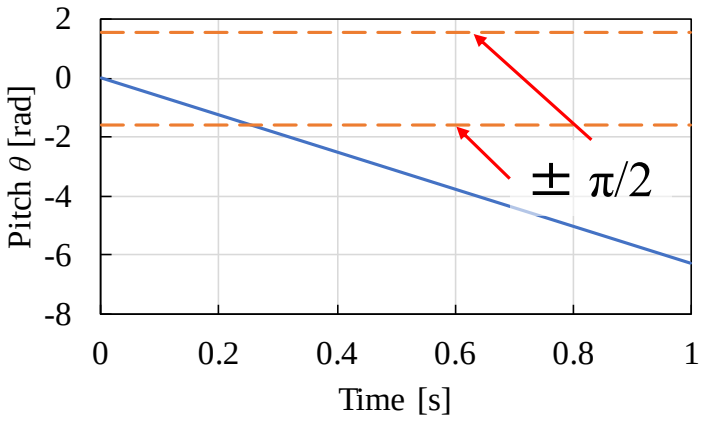


(b) w/ Micro-quaternion

Fig. 5-9 Roll estimation.



(a) w/ Quaternion



(b) w/ Micro-quaternion

Fig. 5-10 Pitch estimation.

５．４　結果および考察

５．４．１　工作機械 2 軸同時旋回による微小クォータニオンの検証

岩間工業社製 5 軸小型工作機械 D5MC のテーブル 2 軸同時旋回を用いて無線センサの姿勢を管理し，微小クォータニオンのアルゴリズムの有用性を検証する．ここでは，A 軸 3.4 rad (200 deg.)，C 軸 31.4 rad (1800 deg.)の回転量が $t = 12$ s で同時に終了する運動を行った. PS-3223 (PASCO 株式会社製 6 軸 IMU)と D5MC テーブル旋回軸の定義を図 5-11 に示す．なお，サンプリング周波数 $f_s = 100$ Hz である．センサ角速度 ${}^{i}\boldsymbol{\omega}$ を慣性座標系オイラー角にそのまま変換した Roll φ と微小クォータニオンを用いて変換した Roll φ を図 5-12(a)と(b)で比較する．この比較により，微小クォータニオンにもとづいた姿勢推定は特異点なく連続していることがわかる. ゆえに, 微小クォータニオンを用いたアルゴリズムにより，姿勢推定に加えて慣性座標系回転量を求めることができることがわかる.

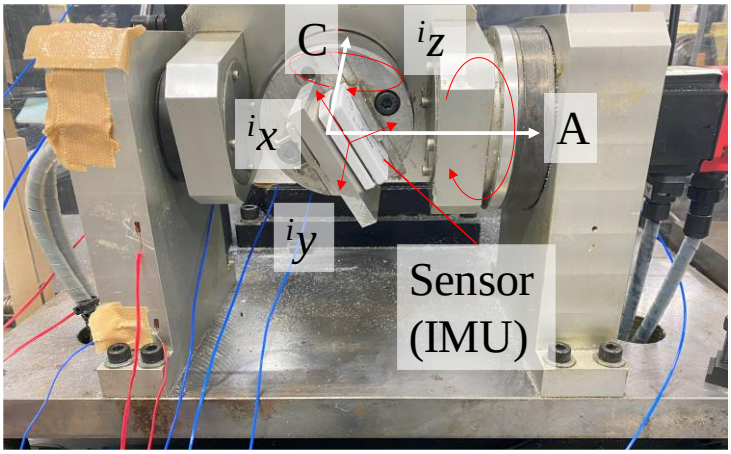
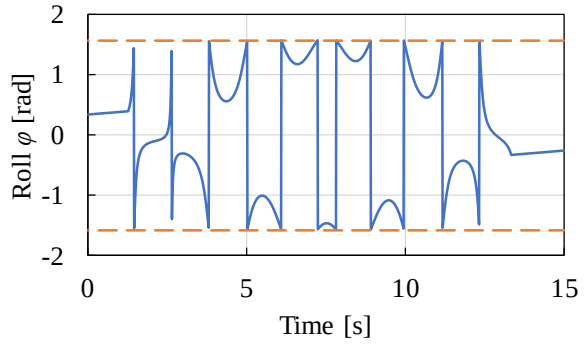
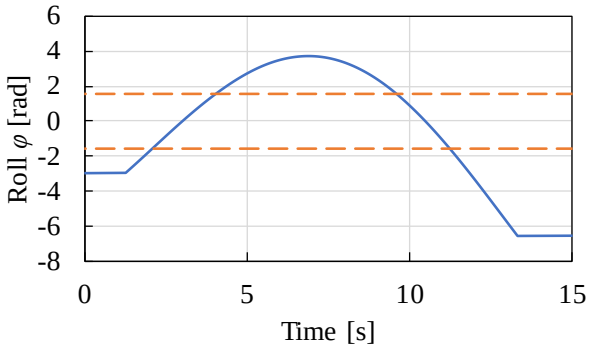


Fig. 5-11 PS-3223 and D5MC.



(a) w/ Quaternion



(b) w/ Micro-quaternion

Fig. 5-12 Roll estimation.

５．４．２　グラスプレスハンドリングにおけるボールの軌道

次に，図 5-1 で示した川崎重工業製双腕スカラロボット duAro を用いて，グラスプレスハンドリングにおける円軌道の推定について検討する．スカラロボットには，円コマンド半径 r_c＝60 mm，操作周波数 f_m＝0.91 Hz を入力した．これは，操作周期 T_m＝1.09 s = 1 / f_m に相当する．また，合計操作時間 T_r＝5 T_m とした．プレートの円運動の入力は，式(5-27)および(5-28)で定義される．スカラロボットは，n 辺の正多角形を使用して円を近似することによって動作命令を生成しており，本研究では n=9 とした．なお，把持させたプレートの大きさは 400 mm 正方形である．

$$x_p = r_c \cos 2\pi f_m t \tag{5-27}$$

$$y_p = r_c \sin 2\pi f_m t \tag{5-28}$$

図 5-13 は duAro 円運動 1 周期の様子を表したものである．図 5-13 のように，閉リンク双腕協調動作により，プレート操りを遂行する．プレートとボールの間にラバーを配する．図 5-14 にボール内蔵センサ情報から算出したボール自己位置推定結果を示す．微小クォータニオンを用いた自己位置推定により連続した解析を実現し得る．ただし，すべりなしを仮定したボール回転量にもとづいているため，式(5-3)で示したようにプレート座標 Σp とボール座標 Σb の相対運動，すなわちプレートからみたボールの相対座標 Σb-p を導出したことになる．

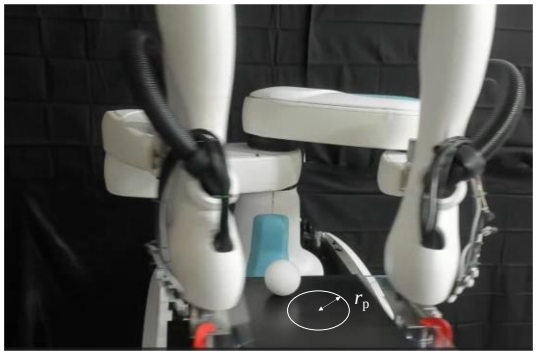
図 5-14 は，微小クォータニオンを使用した自己位置推定により，特異点なしにボールの軌道を追跡できることを示している．図 5-14 に示すように，相対座標系 Σb-p の結果は，式(5-12)で説明したように，相対座標系 Σb-p における円運動半径 r_b - r_p は 40 mm 程度である．これは，式(5-12)で示した角速度 ω が大きい領域におけるゲイン| $G_{ppb}(\omega)$ | = |r_b - r_p / r_p| = 5/7 と 90 %以上一致することがわかる．オイラーベースと微小クォータニオンベースの方法のパフォーマンスを比較すると，提案した微小クォータニオン法が連続軌道を計算できることは明らかである．

図 5-15 は，無線センサを使用して測定されたプレート加速度 a_{px} と a_{py} を示す．コマンドプレート加速度 a_{pxc} と a_{pyc} は，式(5-29)を使用して円形コマンド半径 r_c と操作周波数 f_m から計算され，1.96 m/s^2 であることがわかり，これは図 5-15 に示す最大値と一致している．正多角形を n = 9 に設定したことで，操作周期 T_m ごとに 9 つの異なる振動成分を検出できた．

$$a_{pxc}, a_{pyc} = r_c(2\pi f_m)^2 \tag{5-29}$$



(a) 0 cycle





(b) 1/2 cycle (c) 1 cycle

Fig5-13 Robot motion cycle.

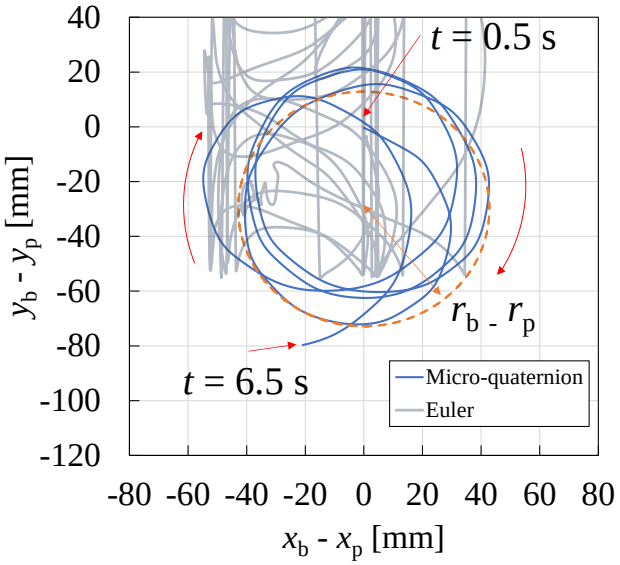
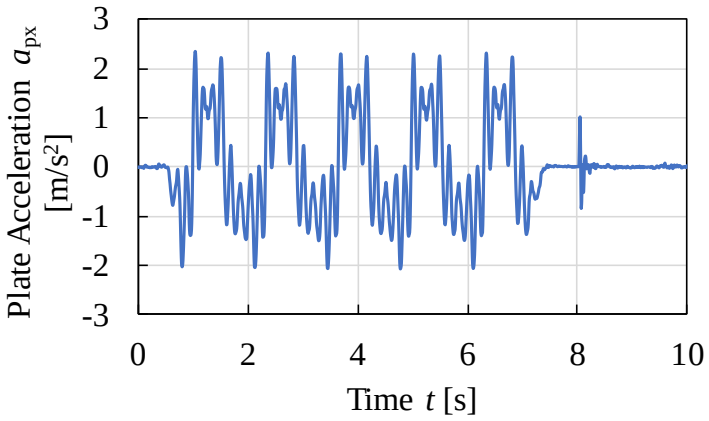
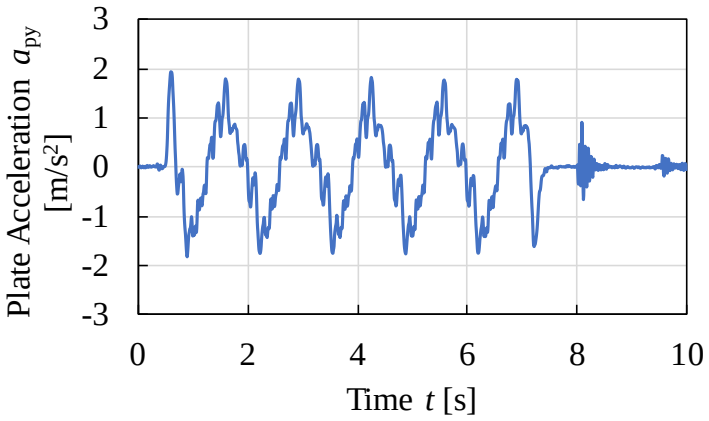


Fig. 5-14 Ball trajectory from wireless sensor built into a ball.



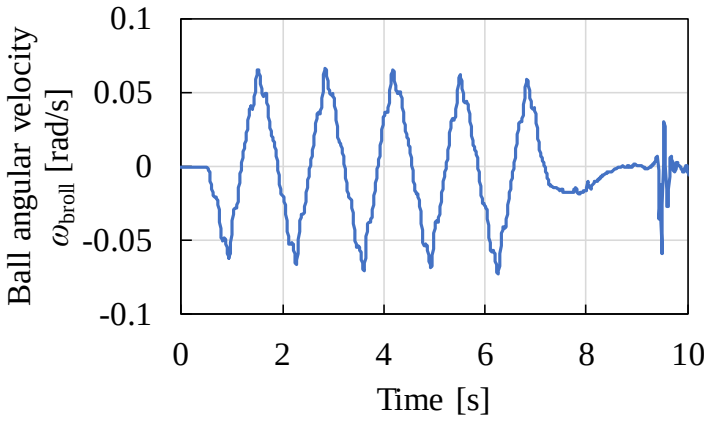
(a) Plate acceleration x



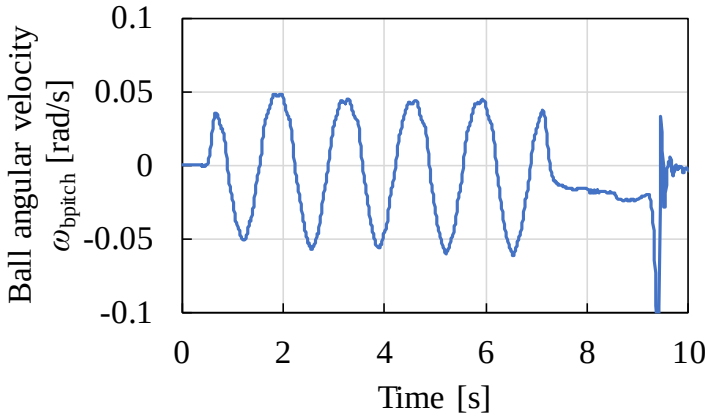
(b) Plate acceleration y

Fig. 5-15 Plate acceleration.

図 5-16 は，無線センサを内蔵したボールから取得したボールの角速度 ω_{broll} と ω_{bpitch} を慣性座標系で表したものである．図 5-15 と図 5-16 を比較すると，操作周波数 f_m がボールの転がり運動にも伝わっていることがわかる．また，プレートの加速度 a_{px} と a_{py} は，ボールの角速度 ω_{broll} と ω_{bpitch} に対して $G_{bp} = \omega_b / a_p = 1/40$ のゲインを持っていることがわかる．これは，形状模倣無線モニタリングシステムが，連続的な軌道推定を通じてボールの転がり運動を効果的にモニタリングできることを示している．



(a) Ball angular velocity roll ω_{broll}



(b) Ball angular velocity pitch ω_{pitch}

Fig. 5-16 Ball angular velocity.

５．５　結　　言

本章では，3D プリンタを用いてターゲットの形状を再現し，制御対象の軌跡や振動，外力を直接モニタリングする形状模倣型無線モニタリングシステムを提案し，微小クォータニオンにより特異点の問題を解決するとともに，双腕スカラロボットによるグラスプレスハンドリングにおけるボールの姿勢推定を行い，次の結果を得た．

(1) 提案手法は，微小クォータニオンを用いたアルゴリズムであり，センサのサンプリング周波数に制約を受けるが連続した姿勢推定が可能である．そのため，慣性座標における回転量の算出にも用いることができる．

(2) 連続した姿勢推定をもとに，プレートからみたボールの自己位置推定をおこなった．推定した相対円運動の半径は，転がりモデルで導出したゲインとおおむね一致した．

参考文献

5.1) Hiroaki Hanai, Akira Mishima, Atsuyuki Miura, Toshiki Hirogaki, Eiichi Aoyama, Monitoring Method of Ball Rolling Motion with Quaternion-Based Signal Processing, Advances in Science and Technology, Vol. 143 (2024), pp 55-60.

5.2) 花井宏旭，三田悠真，和田唯我，中川正夫，廣垣俊樹，青山栄一，大回転角で転がる物体のクォータニオンを用いた位置姿勢モニタリング法の考察 -双腕スカラーロボットのプレート面内運動に基づくボール操りグラスプレス・ハンドリングへの適用-，精密工学会誌（投稿中）

5.3) 廣垣俊樹，青山栄一，水谷優太，中村匡利，間瀬貴大，産業用双腕ロボットのプレート操り動作に基づくグラスプレス・ハンドリングによるボールのリサージュ転がり運動精度に関する研究，設計工学, Vol.57, No.2 (2022), pp. 79-94.

5.4) M. Shariatee, A. Akbarzadeh, A. Mousavi, and S. Alimardani, “Design of an economical SCARA robot for industrial applications,” 2014 Second RSI/ISM Int. Conf. Robot. Mechatron. (ICRoM), December 2014, doi: 10.1109/ ICRoM.2014.6990957.

5.5) M. T. Das and L. C. Dülger, “Mathematical modelling, simulation and experimental verification of a scara robot,” Simul. Model. Pract. Theory, vol. 13, Is. 3, pp. 257–271, April 2005. doi: 10.1016/j.simpat.2004.11.004.

5.6) N. Wang, J. Liu, S. Wei, Z. Xu, and X. Zhang, “The control system design of a SCARA robot,” Int. Conf. Intell. Robot. Appl., pp. 136–145, 2014.

5.7) F. Narváez, F. Árbito, and R. Proaño, “A quaternion-based method to IMU-to-body alignment for gait analysis,” Int. Conf. Dig. Hum. Model. Appl. Health Saf. Ergon. Risk Manag., pp. 217-231, May 2018.

5.8) R. Brard, L. Bellanger, L. Chevreuil, F. Doistau, P. Drouin, and A. Stamm, “A novel walking activity recognition model for rotation time series collected by a wearable sensor in a free-living environment,” Sensors, vol. 22(9), 2022. doi: org10.3390/s22093555.

5.9) X. Kong, “INS algorithm using quaternion model for low cost IMU Sensors,” Robot. Auton. Syst., vol.46 Is. 4, pp. 221–246, April 2004. doi: 10.1016/j.robot.2004.02.001.

5.10) K. Wen, K. Yu, S. Zhang, and W. Zhang, “A new quaternion Kalman filter based foot-mounted IMU and UWB tightly-coupled method for indoor pedestrian navigation,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 69, Is. 4, pp. 4340–4352, February 2020. doi: 10.1109/TVT.2020.2974667.

5.11) H. Hanai, Y. Mita, T. Hirogaki and E. Aoyama, “Monitoring Method of Ball Rolling Motion with Quaternion-Based Signal Processing,” Advances in Science and Technology, vol. 143, pp. 55 – 60, 2024, doi: 10.4028/p-psCvO9.

第６章　無線モニタリング技術の卵の搬送工程への適用

６．１　緒　　言

前章では，第４章までの成果を受け，制御対象の状態を直接計測するべく，3D プリンタを用いてターゲットの形状を再現し，制御対象の軌跡や振動，外力をモニタリングする形状模倣型無線モニタリングセンサを提案した．微小クォータニオンにより特異点の問題を解決するとともに，双腕スカラロボットによるグラスプレスハンドリングにおけるプレート上の転がりボールの姿勢推定を遂行して，その有効性を検証した．しかしながらボールは点対称の単純な形状であるため，より広範な範囲での産業への本技術の応用展開が期待されるものと考えられる．

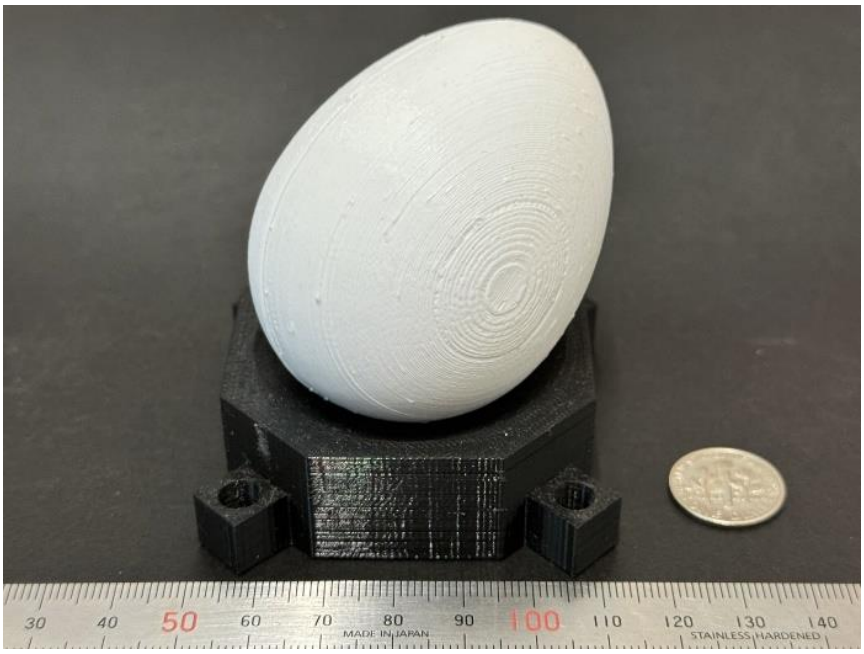
そこで本章 [6.1)]では，形状模倣型無線モニタリングセンサの形状がより複雑な場合を想定したケーススタディを検討する．この場合，環境が単純であろうと複雑であろうと，軌道の計算は困難になる．さらに難しい問題として，形状と環境の両方が複雑な状況を考える．この場合，形状模倣型無線モニタリングセンサからの生データを観察することにより，振動や外力を直接監視することができる．前章の球状から発展させた形状として卵型が考えられる．そこで鶏卵の自動搬送はその表面への割れ [6.2)]などの抑制が強く望まれ，提案する手法が有効となる可能性が高い．そこでこの方法を卵の洗浄・検査工程 [6.3)~6.6)]に適用し，工業的有用性について検討する．この手法により，従来のモニタリング手法では不可能であった高いサンプリング頻度での連続データ取得が可能となることを実証する．

６．２　形状模倣型無線モニタリングシステム

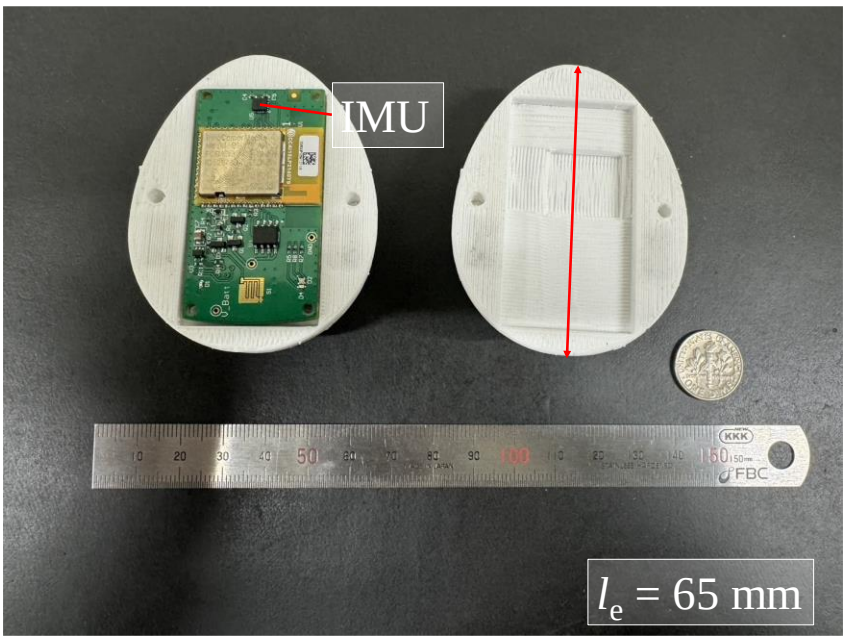
より複雑な形状は，図 6-1 に示す卵型ロボットである．複雑な環境では，制御対象の振動や外力を，付加的な処理をすることなく，生データを用いて直接モニターすることができる．このように，形状模倣型無線モニタリングシステムでは，センサの形状の複雑さとその環境が，モニタリングの精度と性能に影響を与える重要な要因である．

本研究では，形状模倣型無線モニタリングセンサが IMU (Inertial Measurement Unit)を用いてデータを取得した．使用した IMU は株式会社パスコの PS-3223 で，6 軸の加速度・角速度計測，Bluetooth 無線通信，サンプリング周波数 fs=500Hz を特徴としている．低 G 加速度センサの精度は±0.04G，高 G 加速度センサの精度は±1G，ジャイロスコープの精度は±0.017 rad/s であった．無線モニタリングセンサの形状は，溶融積層造形（FDM: Fused Deposition Modeling）3D プリンタ（Replicator+, MakerBot 社製）を使用し，最小積層ピッチ 0.1 mm，ノズル径 0.4

mm，ポリ乳酸（PLA: Poly Lactic Acid）を成形材料として製作した．IMU の質量はバッテリーを含めて 10 g であった. IMU を搭載した鶏卵型センサの質量 m_e は 65 g（大きさは L～LL[6.7]），長辺の長さ l_e は 65 mm であった.



(a) Egg shape.



(b) Half-split egg shape.

Fig. 6-1 Shape-mimetics wireless monitoring robot.

６．３　洗卵検査工程への応用

実際の搬送では，ボールのような単純な形状だけでなく，複雑な形状も対象となる．提案する形状模倣型無線モニタリングシステムの汎用性を確認するために，ケーススタディを行った．非球状の転動輸送において，鶏卵は衝撃に弱い，すなわち強く掴むことができない．検卵・洗浄工程では，搬送中に卵殻に亀裂が入った箇所を特定する必要がある．そこで，形状模倣型無線モニタリングシステムを鶏卵に適用し，鶏卵の搬送過程をモニタリングした．

６．３．１　鶏卵型モニタリングセンサ

鶏卵の検査と洗浄には，鶏卵型の無線モニタリングセンサを使用する（図 6-2）．図 6-2 は，Bluetooth 無線通信によるリアルタイムモニタリングと，時間同期した動画撮影を行う工程に鶏卵センサを投入したものである．実験 A では，鶏卵を一定方向に回転させながら搬送した．B では，鶏卵は素早く投卵される．B で投卵された鶏卵は C で容器に入る．鶏卵は容器に転がされることなく搬送された．

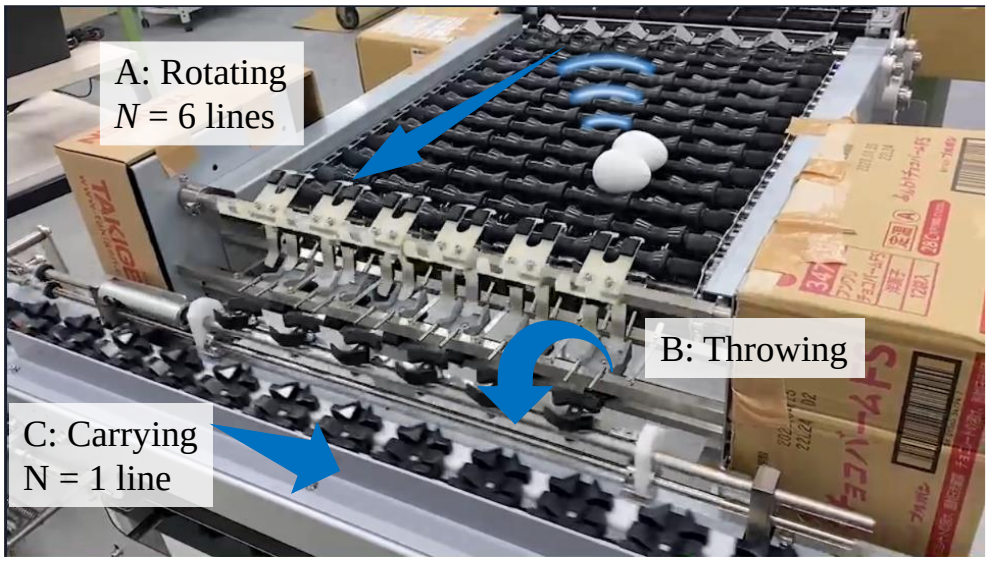


Fig. 6-2 Application to egg transportation in cleaning and inspection processes.

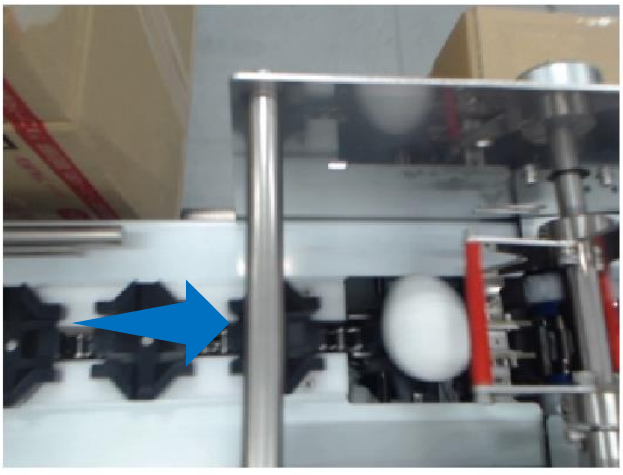
鶏卵型無線モニタリングセンサによるモニタリング結果を図 6-3 と図 6-4 に示す．時間同期したビデオモニタリングにより，衝撃が鶏卵型センサに伝達された時点を示している．図 6-3（a）は鶏卵の回転過程を示す．図 6-3（b）は鶏卵を投げる過程を示す．図 6-3(c)は鶏卵運び工程を示す．図 6-4（a）は，鶏卵三軸加速度合成 a_{en} を示す．図 6-4（b）は，鶏卵縦方向角速度 ω_{el} を示す．図 6-4（c）は，鶏卵短手方向角速度 ω_{es} を示す．



(a) Rotating, $N = 6$



(b) Throwing



(c) Carrying, $N = 1$

Fig. 6-3 Egg transportation in cleaning and inspection processes.

図 6-4（a）は，B 点で鶏卵を投げる際に大きな鶏卵三軸加速度合成 a_{en} が発生していることを示している．また，容器内での卵の搬送中に鶏卵三軸加速度合成 a_{en} が発生していることを示している．図 6-4(b)は，鶏卵の縦角速度 ω_{el} が A 点では約 2.5 rad/s で一定であることを示している．これは，鶏卵が搬送装置の回転に追従して滑ることなく搬送されたことを示している．

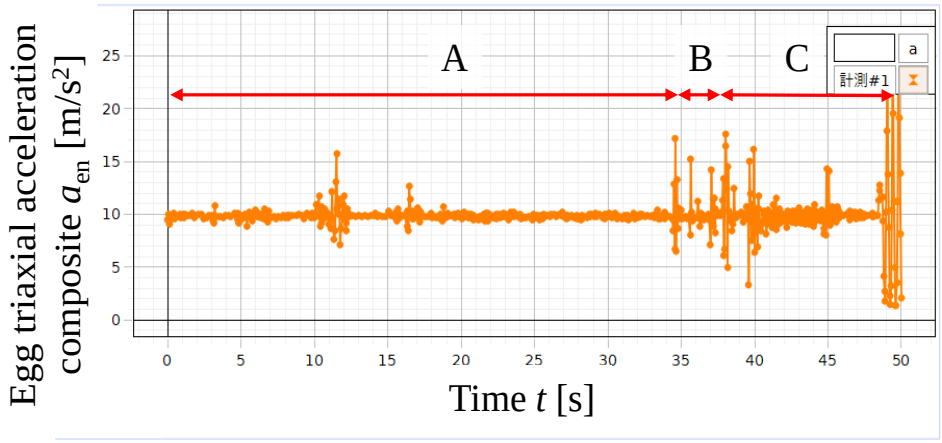
図 6-3(b)に示すように，鶏卵の移動過程において，B 点は鶏卵が投げられた段階を表している．B 点では大きな衝撃が観測され，投卵後も振動が続いている．これは，搬送速度の調整など，投卵速度の最適化が必要であることを示している．

転動相 A（図 6-3(a)）では，三軸加速度合成 a_{en} が瞬間的に 15.6 m/s²に達した．投卵フェーズ B（図 6-3(b)）では，a_{en} は最大 17.5 m/s²に達し，これは投球トランスファーにおける衝撃が，ローリングフェーズに比べて 10%高いことを表している．鶏卵型無線モニタリングセンサは，搬送中のデータを効果的に可視化し，形状模倣型無線モニタリングシステムが搬送中の鶏卵の状態を検出できることを実証した．このように，非対称形状の鶏卵に形状模倣型無線モニタリングシステムを適用することで，鶏卵が割れやすい搬送工程の可視化に有効であることが実証された．

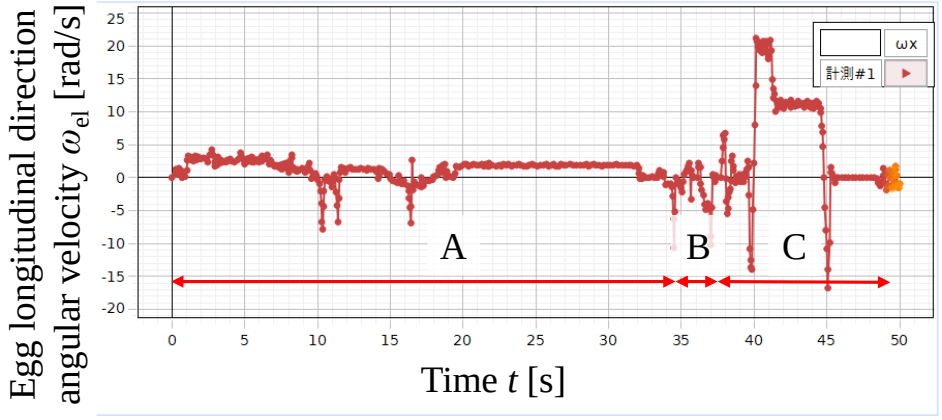
６．３．２　搬送行数に関する考察

洗卵工程はランダムな流水で行われた．鶏卵は複数列に並べられ，搬送される．検査とラベリングのために N 列の鶏卵を 1 列に並べた場合，ライン速度 v_{L1} は N 倍になる．この工程で発生する慣性力は卵の殻にダメージを与えない．図 6-4(b)は，A 点から C 点にかけて鶏卵の縦方向の角速度 ω_{el} が 6 倍に増加することを示しているが，C 点に移行する瞬間に卵の縦方向の角速度 ω_{el} が 10 倍以上になっていることが検出され，この段階で卵殻が特に損傷しやすいことがわかる．

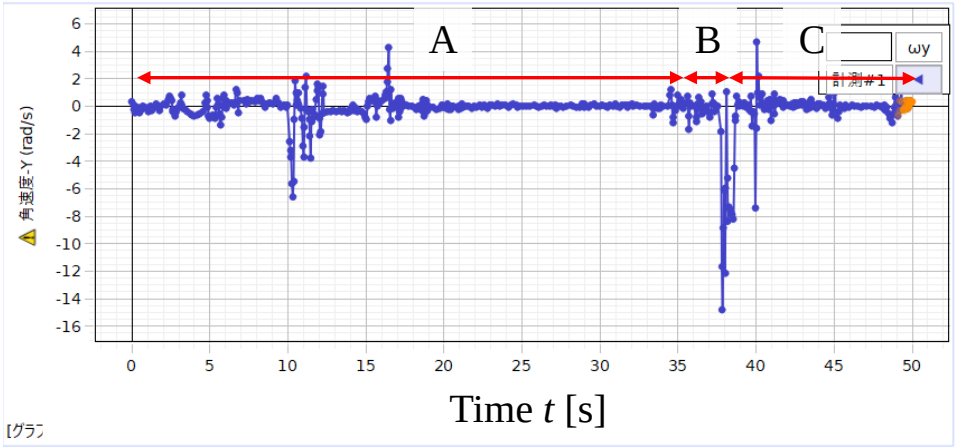
この観察結果は，測定対象にセンサを内蔵した形状模倣型無線モニタリングシステムを組み込むことで，鶏卵のような複雑な形状の搬送中のダイナミクスに関する貴重な洞察を提供できることを示唆している．



(a) Egg triaxial acceleration composite a_{en}



(b) Egg longitudinal direction angular velocity ω_{el}



(c) Egg short-hand direction angular velocity ω_{es}

Fig. 6-4 Egg shaped monitoring data.

６．４　結　　言

本章では，ロボットの形状や外部環境が複雑な場合，すなわち，鶏卵の洗浄工程や検査工程に形状模倣型無線モニタリングシステムを適用し，工業的有用性について検討した．コンベアラインの列数の変化を生データで検出することができ，鶏卵の殻が割れやすい場所の指標となることがわかった．

これらの結果は，無線モニタリングセンサが，その形状や外的条件によって様々な環境に適応できることがわかり，製造業のみならず，食品産業など様々な分野への形状模倣型無線モニタリングシステムの応用が期待される．

参考文献

6.1) Hiroaki Hanai, Yuma Mita, Yuiga Wada, Masao Nakagawa, Toshiki Hirogaki and Eiichi Aoyama, Development of Shape-Mimetics Wireless Monitoring System by 3D Printer and its Application to Grasp-Less Handling Based on Ball Rolling Motion with a Dual-Arm Robot and Egg Washing Inspection Process, Int. J. of Automation Technology, Vol.19, No.1, pp, 71-81, 2025, doi: 10.20965/ijat.2025.p0071.

6.2) 中馬豊，岩元睦夫，鶏加の輸送損傷に関する研究 －加振鶏卵の品質低下について－，農業機械学会誌，Vol.29, No.2 (1967), pp.98-103.

6.3) 友末誠夫，その小さな発明が… “日本の鶏卵商品化機械の礎となって 60 年” その 1，畜産技術，Vol.2017, No.741-Feb (2017), pp.13-21.

6.4) 友末誠夫，その小さな発明が… “日本の鶏卵商品化機械の礎となって 60 年” その 2，畜産技術，Vol.2017, No.742-Mar (2017), pp.16-21.

6.5) 友末誠夫，その小さな発明が… “日本の鶏卵商品化機械の礎となって 60 年” その 3，畜産技術，Vol.2017, No.743-Apr (2017), pp.23-28.

6.6) 友末誠夫，その小さな発明が… “日本の鶏卵商品化機械の礎となって 60 年” 最終回，畜産技術，Vol.2017, No.744-May (2017), pp.25-31.

6.7) 農林水産省，鶏卵規格取引要綱，改正 12 畜 A 第 3226 号　2000 年 12 月 1 日，p.7, 12.

第７章　結　　論

本章では，これまで述べてきた各章の結論の要点をまとめ，本研究によって得られた成果を明確にしている．

７．１　本研究の成果

本研究では，ヒトとロボットの共存・協働に向け，ヒトの五感で感じることができる複数の物理量を取得可能な協働ロボット型のヒューマノイドロボットに着目し，協働型の産業用双腕ロボットの高度な道具の操り動作とその具現化のために IoT 型の無線モニタリングセンサを導入して，その評価を行った．さらに，一般に協働ロボットは可搬質量が小さく使用範囲が限定的である場合が多いが，その課題を払拭する超可搬での動作の具現化ため受動型アシスト装置による協調を提案し，そのモデル化と協調に影響するパラメータについて検討をした．その際の無線モニタリングセンサを発展させ 3D プリンタを用いてターゲットの形状を再現し，ターゲットの軌跡や振動，外力を直接モニタリングする形状模倣型無線モニタリングシステムを提案した．

第１章では，本研究の目的と概要を述べた．

第２章では，大変形の柔軟性を有して扱いの難しい対象・道具としてミュージカルソーに着目して，リアルタイムな制御特性をもつ産業用協働ヒューマノイドロボットを用いてサウンドフィードバックによる最適な動作の探索と，双腕協調動作の実現を試みた．ミュージカルソーを弓で弾く動作をスティックスリップによる自励振動を用いてモデル化した．この検証で，弓速が発音とその周波数の成分に重要であることがわかった．さらに，臨界速度を超えない範囲で目標音階に適した走査速度を探索する必要があることがわかった．スティックスリップによる自励振動モデルをもとに，ボーイング動作に適したロボット動作を考察した．そこで，音の響きを残す，弓の反力を一定にしやすいという点で円弧補間による動作が適していることがわかった．また，サウンドフィードバックによって発音可能な弓のボーイング動作の速度範囲の探索をおこなった．その結果，ミュージカルソーを大変形させ発音の目標周波数を設定するため，バイオリンとは異なり周波数毎に適切な弓速の差が顕著であり，高度な扱いが必要な道具であることが判明した．サウンドフィードバックで得られた音情報からのルックアップテーブルによる学習により，大変形で柔軟性のある未知の道具の発音性について，リアルタイム制御で可変性のあるシステム構築の可能性を検証できた．

第３章では，協働ロボットの超可搬動作を具現化するアシスト装置の自律分

散型の制御を提案した．ヒトがアシスト装置を操るときには，その特性を学習し操り動作を実現する．しかし，一般にロボットはそのような特性を学習することなく動作する．Bluetooth 無線通信を有する慣性センサの加速度情報により，受動型電動バランサが 1 次遅れの伝達関数を有することがわかった．ヒトはその特性を学習することで，アシスト協調を実現できていることが判明し，ロボットでの動作における課題となることもわかった．新たに提案している協働ロボットのパッシブ電動アシスト制御のモデル化のため，非接触，無線計測により，協働型ロボットアームの静剛性及び，動剛性を計測した．その結果，可搬質量が 2 kg 程度の協働型ロボットには定常偏差をなくす積分制御はなく，振動を抑制する微分制御が組み込まれていることがわかった．また，単純なはりモデルとヒンジ構造を用いたモデルを用いて有限要素解析をおこなった．その結果，ヒンジ有りモデルがサーボモータ部の剛性低下を再現できており，モデルとして有効でありえることがわかった．

第４章では，第２章で扱った協働ロボットと第３章で扱ったアシスト装置による片腕の可搬を超える域における自律分散型の協調動作の基礎的な研究を行い，そのモデル化を行った．また，応用作業例として大変形の曲げ制御を試みた．協働ロボットとアシスト装置による自律分散型の協調制御において，搬送物の質量を大きくする場合は，アシスト装置の粘性力と摩擦力を大きくすること，搬送速度を大きくする場合は，ロボットの移動量を分割して制御することで動作を実現できることがわかった．ロボットの位置決め制御系にアシスト系を力の外乱として入力する，比較的簡単なモデルで動作の波形は満足に再現できなった．しかし，その安定性の点で成否を判定できることがわかった．そのとき，搬送物の質量による慣性力が動作の成否に大きく影響こと も判明した．また，応用作業例として，プリロードを加えて大変形の曲げ制御をおこない，従来にない高音域でのミュージカルソー演奏制御が実現できることがわかった．

第５章では，第４章までの成果を受け，制御対象の状態を直接計測するべく，3D プリンタを用いてターゲットの形状を再現し，制御対象の軌跡や振動，外力をモニタリングする形状模倣型無線モニタリングシステムを提案した．微小クォータニオンにより特異点の問題を解決するとともに，双腕スカラロボットによるグラスプレスハンドリングにおけるボールの姿勢推定を行った．微小クォータニオンを用いたアルゴリズムにより，センサのサンプリング周波数に制約を受けながらも，連続した姿勢推定が可能であること，慣性座標における回転量の算出にも用いることができることがわかった．また，連続した姿勢推定をもとに，プレートからみたボールの自己位置推定をおこない，推定した相対円運動の半径は，転がりモデルで導出したゲインとおおむね一致することが確認された．

第６章では，第５章で構築したシステムを応用し，ロボットの形状や外部環境

が複雑な場合として，卵の洗浄工程や検査工程に形状模倣型無線モニタリングシステムを適用し，その工業的有用性について検討した．コンベアラインの列数の変化を生データで検出することができ，卵の殻が割れやすい場所の指標となることがわかった．これらの結果は，無線モニタリングロボットが，その形状や外的条件によって様々な環境に適応できることがわかり，製造業のみならず，食品産業など様々な分野への形状模倣型無線モニタリングシステムの応用が期待される．

第７章では，本研究で得られた成果と今後の課題を簡潔にまとめている．

７．２　今後の課題

本研究では，ヒトとロボットの共存・協働に向けた，協働型の産業用双腕ロボットの高度な道具の操り動作と無線モニタリングによるその評価を行ったが，いくつかの問題点が残されている．

１点目は，協働ロボットのアシストについてである．本研究において，アシスト装置による片腕の可搬を超える域における自律分散型の協調動作の基礎的な研究を行い，そのモデル化を行うとともに，応用作業例として大変形の曲げ制御を試みた．しかし，そのなかで協働ロボットとアシスト装置が共振を起こす現象が確認された．これは，協働ロボットとアシストロボットが個々に動作する分散制御で，個々別動作のため，アシスト協調には振動子群が相互作用や周期外力の作用によって振動タイミングをそろえる，引き込み（同期）現象（図 7-1 の(*)式）による振動が励起されている [7.1)] と考えられる．

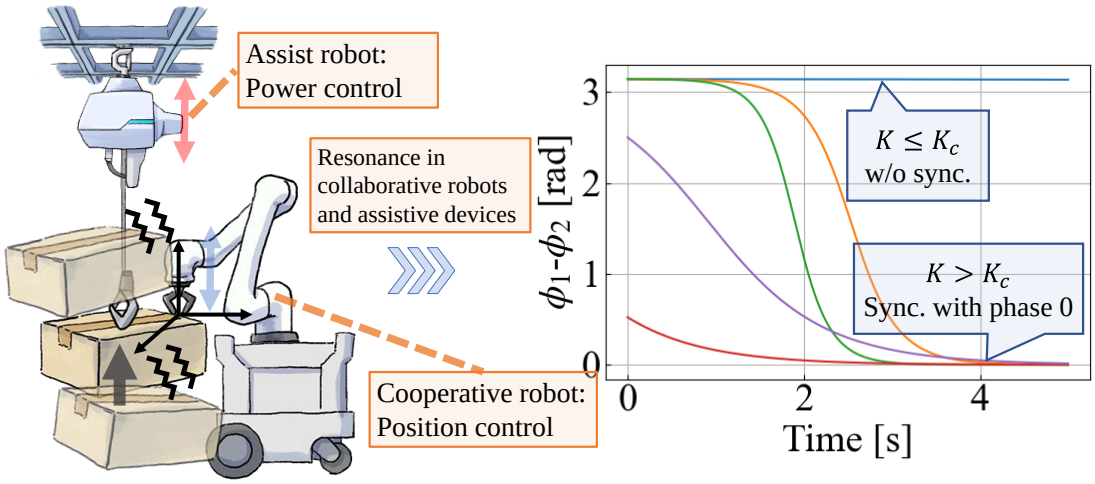


Fig. 7-1 Resonance in collaborative robots and assistive devices

この引き込み現象は，非平衡散逸系に特有なリミットサイクル振動子が大集団を作ると，集団全体が一つの巨大な振動子のようにマクロリズムを示し始めるという一種の非平衡相転移現象であり，制御パラメータ最適化により両制御系による振動を抑制する必要がある．

2 点目は，形状模擬型無線モニタリングセンサの工学的有用性についてである．第 5，6 章で当該センサの演算処理における課題の解決並びに鶏卵の洗浄・検査工程での異常検出における工業的有用性について示した．しかし，得られたデータから，例えば鶏卵の洗浄・検査工程においてどこでなぜ鶏卵が損傷するのか，その損傷を防ぐためには洗浄・検査機をどうすべきかなど，提案したシステムから工学的有用性を十分に引き出せていない．本システムは，3D プリンタを用いて形状を模擬することから，多様なアプリケーションにおいて制御対象の状態を直接計測できると考えられ，計測されたデータから知見を引き出すことが重要である．

これら残された課題を解決して，ものづくり現場のイノベーションに向けた一層の技術革新を進めていく必要がある．

参考文献

7.1) 蔵本由紀, いわゆる「蔵本モデル」について, 応用数理, Vol.17, No.2 (2007), pp.175-177.

謝　辞

本研究の端緒を与えていただき，学部 4 回生よりご懇篤なるご支援とご指導を賜りました指導教官である，同志社大学理工学部　教授　廣垣俊樹　博士に深甚な謝意を表します．また，本研究を遂行し学位論文をまとめるにあたり，懇切丁寧なご指導，ご助言を賜りました同志社大学理工学部　准教授　中川正夫博士，名誉教授　青山栄一　博士に深く感謝申し上げます．さらに，本論文の審査に際し，副査を快くお引き受け頂き，貴重なご助言を賜りました同志社大学理工学部　教授　伊藤彰人　博士に厚く御礼申し上げます．

さらに研究会活動を通じて，信号処理などの技術に関してご指導を賜りました，京都大学大学院工学研究科　教授　松原厚　博士　に謝意を表します．

本研究の遂行にご協力頂いた本学卒業生，本学学部生をはじめ，同志社大学生産システムデザイン研究室の皆様に厚く御礼申し上げます．また，本研究の端緒について具体的なご指導を賜りました研究テーマ直属の先輩である三島明　氏，三浦諄之　氏，関係する実験の尽力してくださった，小澤幹生　氏，河田望　氏，三田悠真　氏，和田唯我　氏，畑中健志　氏に感謝申し上げます．

最後に，本研究は以上の方々は勿論のこと，他の数多くの方々の御指導，ご協力のもとに完成されたものであることを付記すると共に，ここに謹んで御礼申し上げます．

２０２５年３月

花井　宏旭