

(6) 建設ロボット

1) サマリー

建設機械は災害対応にも活用されているが、本来は土木機械であるため、災害現場で求められる繊細な作業性や対地適応性が不十分である。このため被災者が存在する可能性のある建物等の倒壊現場や土砂崩れなどの急傾斜地での作業は、人手に頼らざるを得ないのが現状である。建設ロボットは、これらの問題の解決を目指して開発を進めた重作業の災害対応ロボットである。自分を支えながら作業ができる2重旋回・複腕機構、力覚・触覚を備えたパワフルで器用な作業性を持つロボットアーム、自然で見やすい映像情報を提示する新しい遠隔操作インターフェース、有線給電ドローンと任意視点の俯瞰映像合成によるロボット周囲状況の把握、さらには煙や霧などの環境下でも認識ができる遠赤外線パノラマカメラなど、多数の有益な技術を開発した。これらの技術を本プロジェクトで開発した建設ロボットのプラットフォームに搭載し、模擬災害現場でのフィールド評価を通して、建設ロボットの有効性を実証した。



図 2-6-1 建設ロボット
(不安定な足場上で片腕で自分を支えて倒壊家屋を探索 2018.11@福島 RTF)

2) 技術的成果

2-1) ロボットプラットフォーム

建設機械は、土砂災害や建物の倒壊などの幅広い災害現場で用いられている。建設機械自体は、一般の災害対応ロボットと比較して圧倒的にタフと言えるであろう。しかし不安定な瓦礫を崩れないように撤去する、あるいは被災車両のドアを開けるといった繊細な作業は苦手で、災害現場でのそのような作業は人手に頼らざるを得ないのが現状である。建設機械は、比較的高い不整地の走破性能を有しているが、災害現場に多く見られる急傾斜地や泥濘地への適応性は十分ではない。また災害現場における建設機械オペレータの二次被災の危険を考慮すると、機械は遠隔で操作することが望ましい。無人化施工など、建設機械の遠隔操作の取り組みが行われているが、搭乗操作時と比較して、作業効率が大幅に低下することが課題とされている。本研究開発では、災害対応に用いられる建設機械の代表的な機種である油圧ショベルについて、その機構や油圧、制御、操作のシステムを原点から見直し、運動制御特性、遠隔操作性を飛躍的に向上させた災害対応建設ロボット(以下「建設ロボット」)を実現することを目指した。

建設ロボットでは、以下の3つの研究課題の実現を目標とした。

- 課題1: 力持ちで繊細・器用な作業性を持つ機械の実現
- 課題2: 高い対地適応性の実現
- 課題3: 遠隔操作性の飛躍的改善

これらの課題を解決するために、本研究開発では、以下の新しい機構とシステムを備えた建設ロボットプラットフォームの開発を進めた。

2-1-1) 2重旋回・複腕機構

ナイフとフォークで食事をするように、人間はほとんどの作業を両腕で行う。ロボットも2本の腕を与えることで、作業の自在性が1本腕のロボットに比べて飛躍的に高くなる。一般に2本腕というと、人間のように体の両脇に腕がついた右腕・左腕の構成がイメージされる。これまでに開発された複腕のロボットも、ほとんどがこの構成を取っていると言ってもよいであろう。しかし機械システムを考える場合には、必ずしも人間を規範とする必要はなく、もっと自由な発想を取り入れることができる。本ロボットでは「2重旋回・複腕機構」を採用しているが、これは腰から2本の腕が生えているという構成である。人間も重たいものを持つときは腰を使うように、腰部に腕があることで重負荷への対応能力がきわめて高くなる。また右腕・左腕という概念を捨てて、「上腕」・「下腕」の構成を採用している。この構成では、2本の腕が上下に配置され、しかもどちらの腕も360°エンドレスに回転することができる。こうすることで両腕のレイアウトを自由に設定でき、またロボットのどちらが前方でどちらが後方かという区別もなくなる。生物ではあり得ないロボットならではの機構である。

2重旋回・複腕機構は、図2-6-2のように左右の腕の肩の旋回部を同軸上に重ねており、肩の関節が別々の軸上に配される機構に比べて、はるかに大きな直径のベアリングを使うことができる。またロボットの重心付近で両腕を支持しているので、ロボットの安定性が高いという特徴がある。この機構の採用により、本ロボットは大きな負荷への適応性が高く、重作業に適した構造となっている。また同軸上に配置されたそれぞれの腕が360°回転するため、両腕の向きを自由に変更することができる。

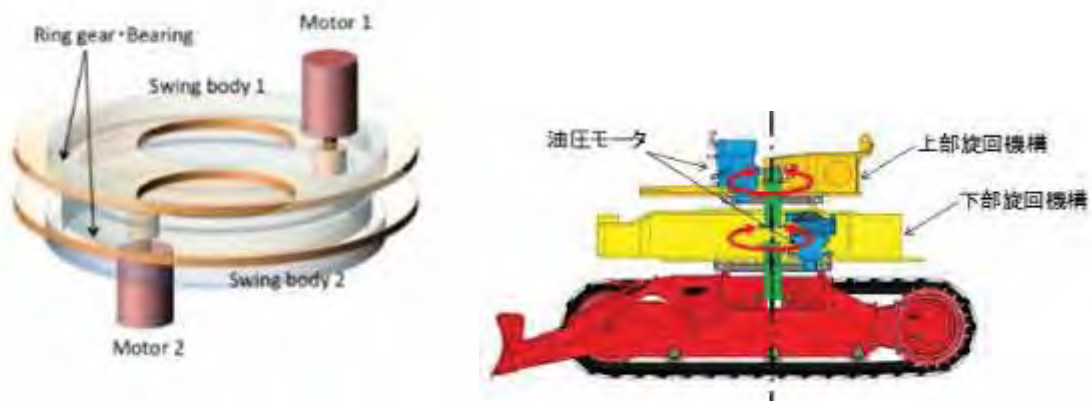


図2-6-2 2重旋回・複腕機構

本ロボットは、自由な方向に向けることのできる腕で地面を支えながら、クローラで移動することが可能で、災害現場の厳しい環境への適応性が高い。例えば、急傾斜地や凹凸の激しい現場で、片腕で立木や地面の固定物を掴んでロボットを安定化させ、もう片方の腕でハンドリング作業を行うことが可能である。また腕とクローラを協調して動作させることで、大きな段差を乗り越えることもできる(図2-6-3)。また両腕を同じ方向に向けて複腕の協調作業を行うことも可能だが、2重旋回の特徴を活かして、右腕・左腕の配置を入れ替えることができる。これにより、片腕にカッター、もう一方の腕にグリッパのように2つの腕に異なる機能を与えた場合、作業状況に応じて各腕に適切な機能を割り振ることができ、多様で複雑な災害現場の作業に柔軟に対応することができる。

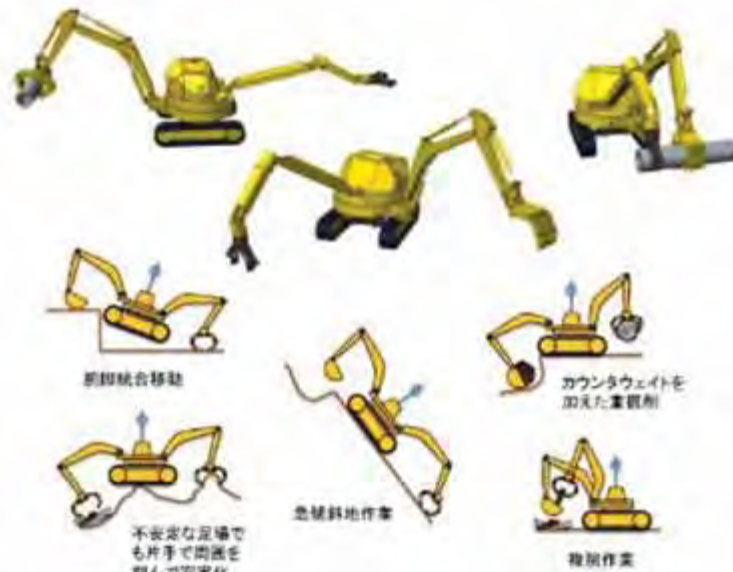


図2-6-3 2重旋回・複腕機構の活用

2-1-2) 新しい油圧制御システム

腕が2本あっても、それらを自在に操ることができなければ、むしろ互いの腕が邪魔になってデメリットの方が大きくなってしまう可能性が高い。この課題を解決するために建設ロボットでは、油圧システムの応答性を従来の建設機械よりも1桁高めるとともに、アクチュエータの摩擦特性を大幅に改善している。またこれらの技術の導入により、油圧アクチュエータの圧力を高速かつ適正にコントロールする制御手法を導入し、作業機の高い運動特性と力制御性を実現している。図2-6-4に新油圧システムの応答例を示した。

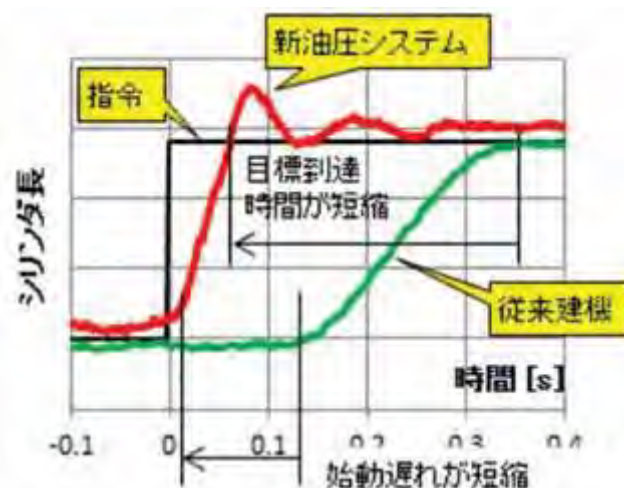


図2-6-4 新油圧システムによる運動特性の改善

これらの新しい機構とシステムを基に、建設ロボットの設計を行い、単腕モデルによる基本性能確認、2重旋回・複腕モデルのプロトタイプ機の試作を経て、最終的に図2-6-5に示す建設ロボットのプラットフォームを開発した。

建設ロボットは、無線による完全遠隔操作方式を採用し、車体重量は2.5t、駆動源として16kwのディーゼルエンジンを搭載している。関節は全軸すべて油圧駆動で自由度の合計は21である。

また複腕の機能を安全かつ十分に活用するために、両腕の干渉防止制御や外力に応じて腕を柔く追従動作させるコンプライアンス制御を導入している。これにより自在性の高い複腕協調作業を可能としている。



図2-6-5 建設ロボットプラットフォーム

プラットフォームロボットは2台製作し、両方を使って評価実験を行なった(図2-6-6)．バックアップ機があることにより、転倒の可能性のある極限安定性の評価実験などに取り組むことができた(図2-6-7)．また2台を使い分けて、一方で平常時の建設作業などへの適用を睨んだ部材組立の評価実験を並行して行なうことができた(図2-6-8)．また繊細で器用な作業性の評価として、ロボットの微細作業性の評価指標として代表的なピンの孔への嵌合作業の実験を行った．その結果、隙間50ミクロンのピンと孔の嵌合作業が可能であることを確認した．(図2-6-9)



図2-6-6 建設ロボットプラットフォーム 1号機，2号機



図2-6-7 極限車体安定実験



図2-6-8 部材の組立実験



図2-6-9 ピンの嵌合作業(隙間50ミクロン)

2-2) 有線給電ドローン

無人建設機械に第三者視点を提供する有線給電ドローンを図2-6-10に示す。ここでは、有線給電ドローンから、建設機械の側面より撮影した画像を、操作者に提供している。これにより、建設機械に搭載するカメラでは認識困難な、バケットの奥行き位置情報を確認できる。この有線給電ドローンには、以下の特徴がある。



図2-6-10 無人建設機械に搭載した有線給電ドローンの試験の様子

1. ケーブル長の範囲内であれば、任意の位置にホバリングし、第三者視点を提供することが可能
2. 給電ケーブルを通じて給電を行うため、通常のドローンと比較し、長時間飛行することが可能
3. ドローンが制御不能になったとしても、そのケーブル長の範囲外に影響を与えない
4. 着陸時は、ケーブルの強制巻き取りにより、ヘリパッドにピンポイントで着陸を行うことが可能

なお、従来の有線給電ドローンに関する研究開発は、その多くが定点観測を目的としたものである。これに対し、本研究で提案する有線給電ドローンは、無人建設機械に搭載することを目的としているため、以下に示す3つの特徴がある。

まず一つ目の特徴が、水平飛行の必要性である。一般的な有線給電ドローンは、主に定点観測を目的とするため、垂直に上昇した後、ほぼ動かない。これに対し、無人建設機械の操縦に必要な第三者視点は、作業の内容に応じて、低い高度で水平方向に移動を求められることが多い。この場合、給電ケーブルが垂れ下がると、環境中の障害物と接触し、抜けられなくなる恐れがある。このような問題を回避するため、常に適度な張力で有線給電ケーブルを引っ張る必要がある。ただし、強く引きすぎると、有線給電ドローンの飛行に悪影響を与える。そこで、本研究では、開発するシステムに、給電ケーブルの高精度な張力制御機能を搭載することとした。

二つ目の特徴が、振動や傾斜に対する頑強性である。多くの建設機械はエンジンで動作するため、建設機械本体には、常に振動が発生する。更に、対象とする環境は不整地であり、建設機械自体が傾斜する可能性がある。よって、バネと可動プーリーを利用する一般的な張力調整機構では、この振動や傾斜が可動プーリーに影響して張力推定に誤差が生じ、高精度な張力制御が困難となる。そこで、本研究では、パウダクラッチを利用した、振動や傾斜に頑強なケーブル張力調整機構を開発した。図2-6-11に、開発した有線給電ドローンならびに、ヘリパッドを示す。



図2-6-11 開発した有線給電ドローンならびにヘリパッド

三つ目の特徴が、有線給電ドローンの位置推定手法である。自然災害が発生する際、有線給電ドローンを、災害環境の近くから目視で飛行させることができるとは限らない。そこで、有線給電ドローンの離着陸を含めた自動飛行機能が必要となる。ドローンの位置推定には、一般には、GNSS (global navigation satellite system) を利用することが多いが、対象となる災害環境には、崖や樹木、大きな橋などが存在する可能性があるため、GNSSが利用できない場合も考えられる。そこで本研究では、ケーブル形状を測定してドローンの位置を推定するという、新たな位置推定手法の開発を進めてきた。位置推定精度の目標としては、悪天候時の DGPS の精度よりも良いものとし、今回想定する使用環境を考慮した上で、15m のケーブルを使用する場合に誤差 2m 以内と設定した。以下に、本研究で実現したケーブル形状測定によるドローンの位置推定手法について概要を述べる。

ある自由な二点間に紐状の物体を垂らすと、その物体の形状はカテナリ曲線となることが知られている。本研究では、図2-6-12に示すように、ドローンとヘリパッドを結ぶテザーがカテナリ曲線となると考え、それらの相対位置を得る手法について考える。

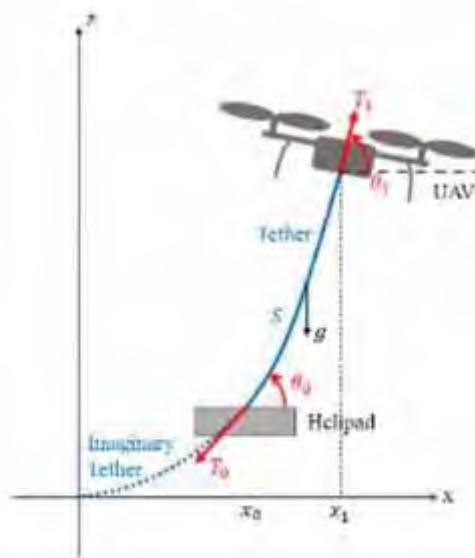


図2-6-12 開発した有線給電ドローンならびにヘリパッド

ある点がカテナリ曲線上のどこに位置するかを知るためには、ケーブル張力とケーブル送り出し角度ならびに、ケーブル長がわかれば良い。ケーブル張力は、パウダクラッチを利用したケーブル張力調整機構により得ることができる。また、ケーブル送り出し角度は、ヘリパッド上に搭載した角度測定機構（図2-6-11参照）により計測を行う。さらに、ヘリパッドから繰り出したケーブル長は、ケーブルを巻くスプールの回転量により推定する。これにより、ヘリパッドとドローンを繋ぐ、たるんだテザーにより、ドローンの位置推定が可能となる。また、張力を三次元のベクトルとして求めることで、三次元空間内の位置推定も可能となる。

上述の手法の評価を行うため、建設機械にヘリパッドとドローンを搭載し、位置推定実験を行った。ドローンの位置は、トータルステーションを用いて計測し、開発したヘリパッドによる位置推定軌跡と比較する。図2-6-13に実験結果を示す。この結果より、ドローンの位置推定が精度良く行われていることが分かる。なおこの試験により、最大約7 m のケーブル長の範囲において、位置推定誤差は最大1 m 程度となった。また、風速の平均5 m 程度の環境でも、位置推定が可能であることを確認した。

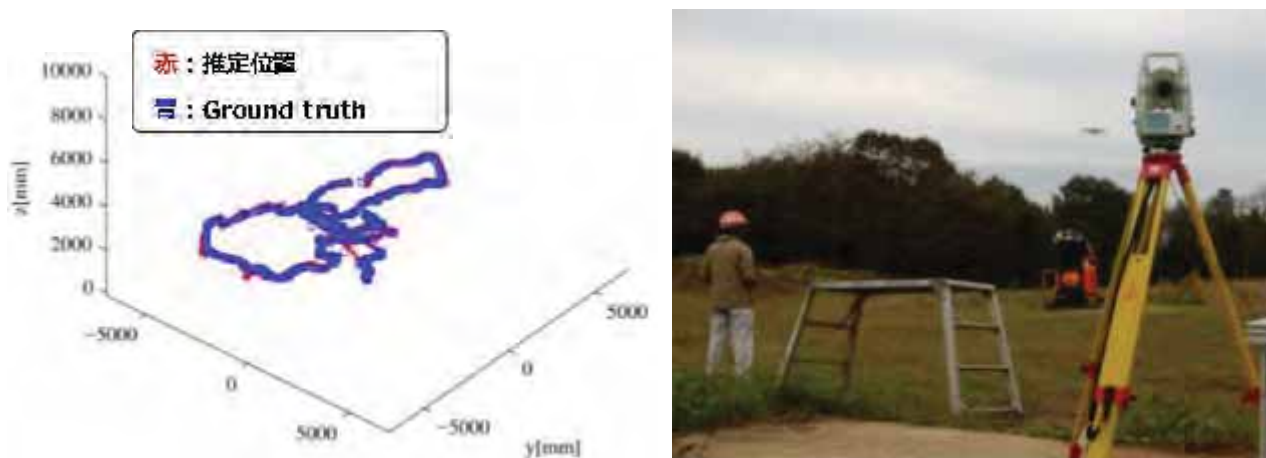


図2-6-13 有線給電ドローンの位置推定試験

（左図が位置推定結果の比較．右図が実験の様子を示す）

また、開発したシステムの有用性を検証するため、本研究では、2016年よりこれまで、フィールド試験を複数回実施してきた。以下に、2017年12月に土木研究所で実施した、「上空から有線給電ドローンで得た画像情報を用いた油圧ショベルの遠隔操作試験」について紹介する。この試験の対象は、通常、油圧ショベルに搭乗し作業を行う10名の操作者である。図2-6-14に試験の様子を示す。本実験における操作者の作業は、「モデルタスク」という土木研究所で定義されたタスクである。これは、油圧ショベルの遠隔操縦により、油圧ショベルをターゲット付近まで移動させ、バケットの先で対象となるターゲットを引っかけて所定の位置まで移動させ、更にターゲットを元の位置に移動させた後、油圧ショベルを元の場所に移動させるものである。

10人の操作者が試行した結果、すべての操作者は、有線給電ドローンからの画像の使用によるタスクの実現に成功した。また、多くの操作者は、油圧ショベルの走行には、有線給電ドローンで得た空中画像を主に使用し、ターゲットの移動タスクを実施している際には、建機に搭載した前方カメラの画像を主に使用することが分かった。さらに、試験後のインタビューで、「空中画像は、油圧ショベルの周囲の環境状況を把握することができるため、走行において安心感があります」という意見を頂いた。一方、本システムは、有線給電ドローンの移動に伴って視点が大きく移動してしまうため、操作に悪影響を及ぼすことを危惧していたが、「視点移動はあまり気にならない」という操作者からの意見が多数を占めた。また、一部ではあるが、操作者の中には、有線給電ドローンで得た空中画像を一切見ないで作業を行う方もいた。



図2-6-14 有線給電ドローンを用いた遠隔操縦試験

2-3) 極限画像処理

2-3-1) 任意視点俯瞰映像

災害現場等の極限環境へロボットを投入する場合、安全面を考慮し、オペレータはロボットへ遠隔地から指令を送ることが一般的である。このような遠隔操作はロボットにオペレータが搭乗する場合と比べて操作性が低減すると言われている。その一因は、視野の違いである。例えば、搭乗している場合は頭を振れば様々な視点から作業物体を確認することができるが、遠隔操作時にはロボット上のカメラを介して周囲を確認するため、自由に視点を移動することができない。その結果、死角が多く発生する。このような死角の発生を抑制することが操作性の向上のために有効である。操作性の低減防止を目的として、視点を任意に移動させることが可能な俯瞰映像を生成する。俯瞰映像は、ロボットに搭載した4台のカメラの画像を合成することで生成される（図2-6-15左）。4台のカメラの画像を半球状のスクリーンに貼り付けることで合成が行われる。そのためには、各カメラ画像の位置関係をキャリブレーションする必要がある。そこで、実際の作業現場において簡単にキャリブレーション可能なキャリブレーション手法を提案した。ロボットの周辺に正方形の板（ここでは1m四方のダンボール板）を隣り合うカメラの共通視野に設置する（図2-6-15右）。それぞれのカメラ画像上のその板の頂点の座標を共通する座標と設定し、4台のカメラの相対位置を計算する。また、俯瞰映像からはスケール情報が失われているため、スクリーンのスケールと調整する必要がある。この板の大きさは既知であるため、この板の大きさを基に大きさを調整する。



図 2-6-15 俯瞰画像（左：ロボットに搭載したカメラの配置位置，右：キャリブレーション）

提案した任意視点俯瞰映像は、ロボットの周囲を1人称視点ではなく3人称視点で確認することが可能である。しかし、3人称視点による操作のためには自身の姿勢も確認する必要がある。そこで、実際のロボットを模したモデルを俯瞰画像の中央に配置した。このモデルはロボットから実際の角度情報を得ることにより、実際のロボットの姿勢を取る。ロボットの操作時、ロボットの向きを把握することが特に難しく、このようにロボットの向きを3人称視点から把握できるシステムは操作性の低減の防止に有効である。さらに、本システムではロボットの向きや傾きを2本の線により鮮明に表している（図2-6-16左）。ロボットの操作時にはクローラの向きが進行方向を示すため特に重要である。そこで、青い線がクローラの向き、赤い線がクローラに垂直な向きを示している。

4台のカメラでロボットの全天周を撮影することができれば、俯瞰映像は作成することができる。即ちそれぞれのカメラの視野は水平方向に最低でも90度あればよい。しかし、使用するカメラには視野の広い魚眼レンズを装着し、視野を180度程度に広げることによって、システムに冗長性を持たせた。この冗長性によってカメラが破損した場合にも他のカメラ映像を用いた補完処理が可能となっている（図2-6-16右）。



図 2-6-16 俯瞰画像（左：ロボットの向き、右：カメラ故障時の補完）

2-3-2) 半隠消映像

死角を増やす別の原因としては、カメラに対する隠れの問題も挙げられる。この隠れとは、カメラや作業対象の物体が障害物やロボットの作業機（腕など）の陰に隠れてしまうことを言う。そこで、本研究ではロボットの腕に2台のカメラと3D測距センサを設置して、ロボットの手先を透視する半隠消映像システムを提案した（図2-6-17）。

ロボットの腕には、作業対象を確認するためのカメラ（以降、メインカメラ）が設置してある。メインカメラの視野に、障害物やロボットの腕が侵入してしまうことが隠れの原因となる。そこで、メインカメラの映像に対してサブカメラの映像を重畳することで半隠消映像を生成する。サブカメラはメインカメラの死角を撮影するように配置する。測距センサによりメインカメラ画像内の隠れの位置と、サブカメラ画像内のメインカメラでは隠れている場所を識別する。そして、サブカメラ画像内のその場所をメインカメラに重畳することで半隠消映像を生成する。このシステムは完全にロボットに後付けすることが可能であり、既存のシステムに設置することができる。



図2-6-17 半隠消映像システム（左：半隠消映像システムの全体像、右：半隠消映像）

2-3-3) マルチモーダル画像融合による極限センシング

霧や夜間などの悪環境においても、周囲の状況を認識することを目的として、遠赤外線カメラを活用したセンシングシステムの開発を行った。開発システムでは、遠赤外線のみならず、通常の可視カメラも活用し、可視カメラ画像と遠赤外線画像が、高精度に位置合わせされた状態で表示することを目指した。

本目的を達成するため、遠赤外線・可視同軸カメラシステムの開発を行った。概観図を図2-6-18に示す。可視カメラと遠赤外線カメラを配置して、ビームスプリッタにより、可視光と遠赤外線光を分離するシステムを開発した。なお、屋外で活用する場合、防塵対策が重要となる。しかしながら、可視光の光学窓やレンズに良く用いられるガラスは、遠赤外光を透過しない。また、遠赤外線光の光学窓やレンズに良く用いられるゲルマニウムは、可視光を透過しない。このため、遠赤外線・可視同軸カメラシステムに適切な光学窓を設置し、防塵対策を行うことが困難であることが知られていた。このような背景のもと、遠赤外線・可視同軸カメラシステムにタイして、防塵性を向上させる目的で、適切な光学窓の検討を行った。その結果として、厚さ10マイクロメートル程度のフィルムを利用することで、可視光と遠赤外線光を同時に透過しつつ、防塵性を高めることが可能であることを確認した。光学窓としてフィルムを採用したシステムの概観を図2-6-19に示す。



図2-6-18 遠赤外線・可視同軸カメラシステム



図2-6-19 概観

さらに、ハードウェア的に同軸となるように設計したものの、機械精度には限界があり、厳密な位置合わせは困難であることも確認された。そこで、可視光カメラと遠赤外線カメラを同時に、その相互位置やカメラの内部パラメータを同時にキャリブレーションする校正ツールの開発を行った。可視光カメラ用のキャリブレーションは広く利用されている。可視光用のカメラキャリブレーションでは、チェッカーボード模様のターゲットを撮影する必要がある。遠赤外線カメラでも同様のことが可能であるものの、遠赤外線カメラに対しても可視光カメラに対しても同様に、チェッカーボード模様になるような簡便なキャリブレーションターゲットが存在していなかった。そこで、本研究開発で、図2-6-20に示すような二層式のキャリブレーションターゲットを新しく、開発した。この新しく開発した二層式のキャリブレーションターゲットを利用することにより、可視光カメラに対しても、遠赤外線カメラに対しても、安定的にチェッカーボード模様を提示することが可能となった。その結果として、従来の手法と比較して、2倍から10倍程度、高精度にキャリブレーションを行うことが可能となった。



図2-6-20 二層式キャリブレーションターゲット

続いて、遠赤外線カメラは一般に解像度が低く、広画角化することが困難であることが知られている。一方で、ロボットでの活用を考えた場合、周囲の環境を広く認識することが望まれる。そこで、可視カメラと複数の遠赤外線カメラを活用し、可視・遠赤外線のパノラマ撮影システムの開発を行った。その概観を図2-6-21に示す。



図2-6-21 可視・遠赤外線パノラマ撮影システム概観

図2-6-22に評価会でのデモンストレーションの様子を示す。このように可視光カメラおよび肉眼では全く認識できないような煙の中の人物や状況が、遠赤外線画像により確認できることがわかる。また、この可視・遠赤外線パノラマ撮影システムにも、先に開発した高精度キャリブレーション技術が利用されており、可視光画像と遠赤外線画像の位置合わせが高精度に行われている。そのため、可視画像と遠赤外線画像で対象物の対応がとれており、可視画像の情報と遠赤外線画像の情報を有用に組み合わせることが可能である。

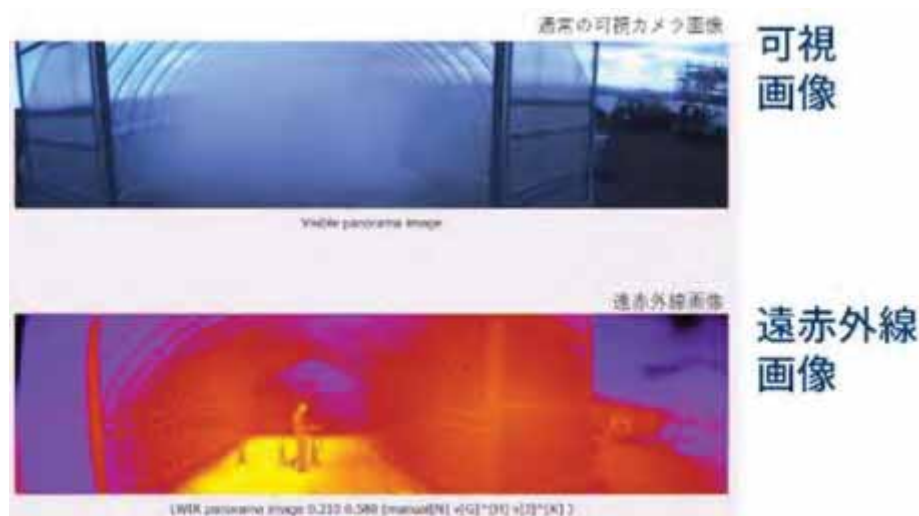


図2-6-22 可視・遠赤外線パノラマ撮影システムの撮影例

2-4) 力覚提示

繊細で器用な作業を実現するためには、ロボットアームに加わる力の情報が不可欠である。また2本のアームを同時に使った複腕協調作業では、両方の腕の間に働く力をうまくコントロールすることが必要である。通常の産業用ロボットなどでは、手首部に6軸力センサを取り付けて力情報を得るのが普通である。しかし力センサは耐衝撃性が低く、建設ロボットのように重作業に用いられるロボットに適用すると、衝撃で容易にセンサが壊れてしまう。本研究開発では、力センサを用いずに、建設ロボットアームの手先負荷力を高精度に推定する手法の開発を行った。

災害対応建設ロボットの手先負荷力を推定するには、衝撃に強く、タフな推定法でなければならない。本研究開発では、シリンダ圧センサと加速度センサを利用することで力覚センサを廃し、衝撃に

強いタフな推定法を実現している。本手法の特徴は、アームの重力項や摩擦力を補償して静的負荷力を精度よく推定できるだけでなく、加速度センサ信号から計算されるアームの慣性力から、衝撃力も推定できることである。推定した手先負荷力は、6軸ハプティックデバイスを介して操縦者にフィードバックされる。図2-6-23に力覚提示システムの構成を示した。

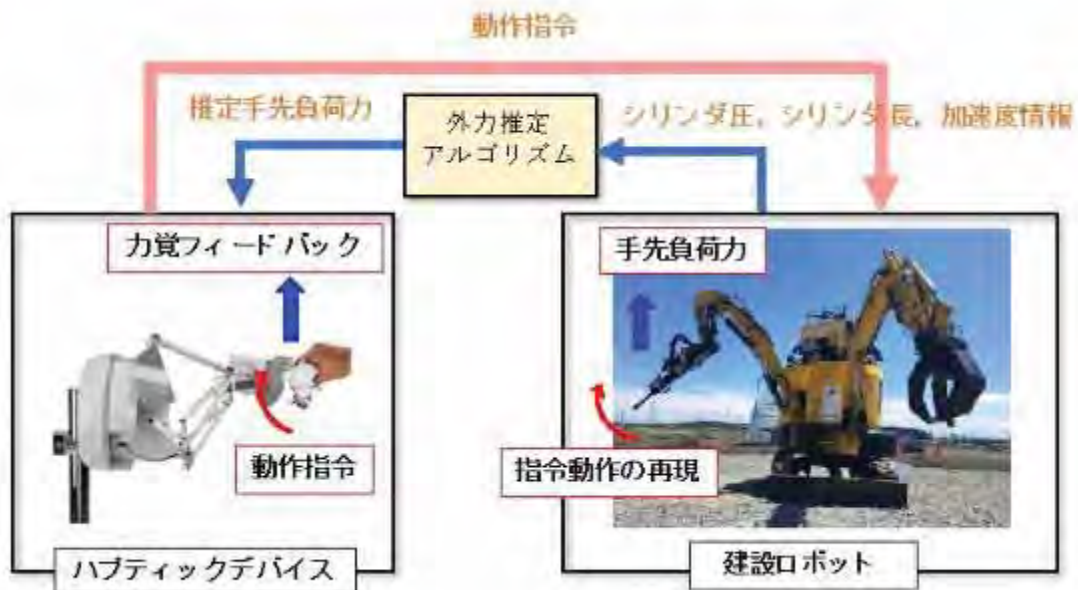


図2-6-23 力覚提示システム



図2-6-24 仮想ツール把持による6軸力覚提示

推定できる手先負荷は、原理的には並進力とモーメントの6成分であるが、今回の実装では作業中に手先先端に加わるモーメントはほぼないことから、並進力成分のみを推定した。ただし操縦者が操作するハプティックデバイスは6軸の力覚提示が可能であることから、作業によっては図2-6-24に示すように操縦者があたかもロボットのツール(ハンド)を掴んでいるような仮想ツール把持を想定して6軸の反力が提示されるようにした。

開発した手先負荷力の推定手法では、静的負荷力と衝撃力が別々に推定できることを利用して、ハプティックデバイスに提示する力覚のスケールをそれぞれの力ごとに適切に変更している。また推定結果に含まれるノイズを除去することにより、透明性の高い力覚の提示を実現している。反力提示の例を図2-6-25に示す。ここでは力覚提示する力に閾値を設け、閾値以下の推定値は力覚提示しないことで、先端が環境に接触したときのみ力覚提示がされるようにしている。また加速度計の値から推定される衝撃力の縮尺率をシリンダ圧から推定される静的な外力項の縮尺率より大きく設定することで、ハプティックデバイスの限られた力覚提示可能範囲を有効に利用し、衝撃力と静的外力の両方が操縦者に適切に提示できている。

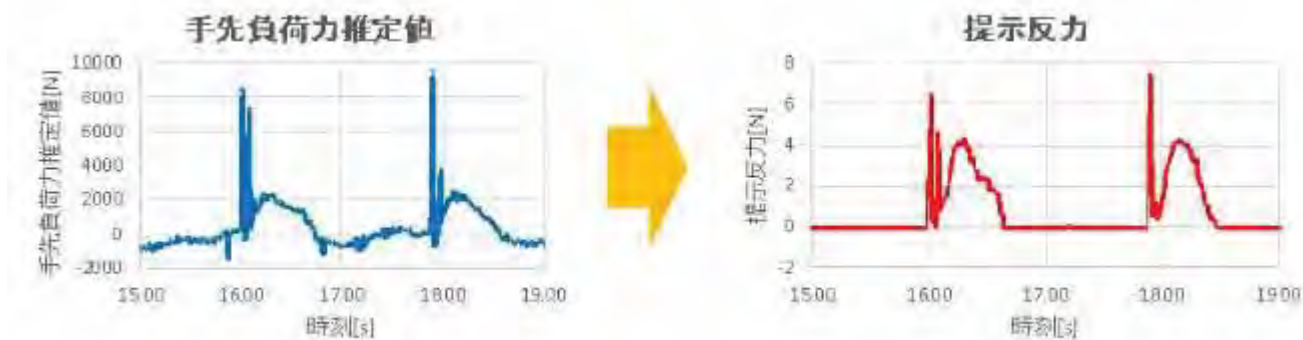


図2-6-25 力覚提示の例

推定した手先負荷力の力覚提示は作業のあらゆる局面で有効である．一例として，図2-6-26には，2017年11月の東北大学でのフィールド評価会において，開発した手先負荷力推定法を複腕建設ロボットのアップパーアームに実装して行った実験結果を示す．アップパーアームで砂利の下にコンクリート板を埋めた地面と砂利のみの地面を数回たたきつけた場合の推定結果を示している．加速度センサの情報を利用することで動的な衝撃力も推定できており，力覚だけでコンクリート板と砂利の区別が可能であることが示唆される．また図2-6-27に示す倒壊家屋の屋根板を，建物が再倒壊を起こさないように慎重に引き剥がすといった作業でも，力覚提示が非常に効果的に働くことを確認している．

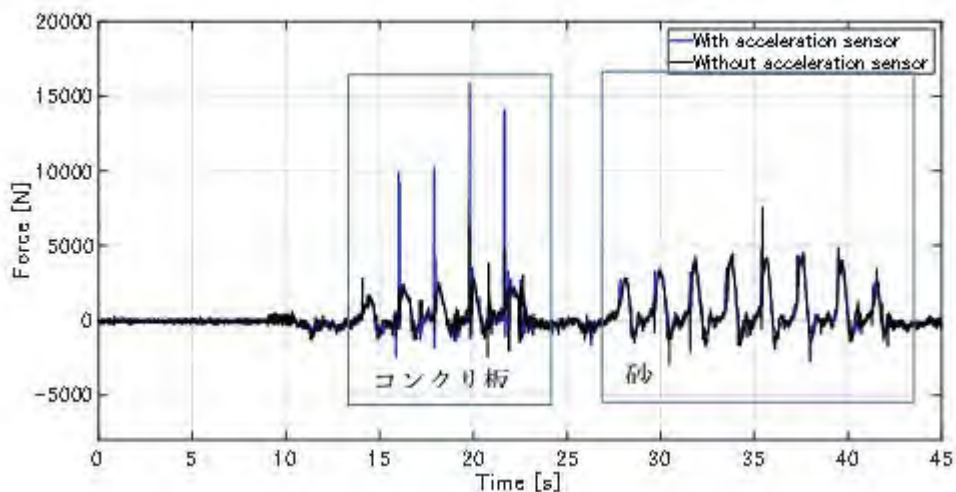


図2-6-26 2017年11月のフィールド評価会での実験結果



図2-6-27 力覚提示を使った屋根板剥がし作業

2-5) 触覚伝達システム

2-5-1) システムの概要

建設ロボットが物体を把持や掘削する際に筐体に生じる高周波振動情報をオペレータに遠隔伝送するシステムを構築した。

ハンドによる瓦礫除去やバケットによる土砂掘削など、建設ロボットの活躍が期待される災害環境下での作業には環境との接触が伴う。このような接触に伴ってハンドやバケットなどでは高周波の振動が発生し、それらの振動情報は接触対象の情報（例、掘削する素材の違い）や運動情報（例、バケットの掘削速度）を反映する。そこで、これらの高周波の振動情報をオペレータに伝送することで、従来の無線化された建設機械では達成されていなかった繊細な遠隔作業性を実現する。

構築したシステムは、

1. 伝播する高周波振動を利用した頑強な触覚センシングシステム
 2. 操縦インタフェースによらず利用可能な触覚ディスプレイシステム
 3. 高周波振動をヒトが知覚しやすい振動へと変調する信号処理手法
- の研究成果を統合することで実現した。

2-5-2) 伝播する高周波振動を利用した頑強な触覚センシングシステム

建設ロボットのハンドやバケットが物体と接触する際に発生した高周波振動情報は筐体を伝播する。この筐体を伝播する高周波振動を計測する触覚センシングシステムを構築した。

伝播振動を利用することで、過酷な災害環境下で情報を取得可能なタフなシステムが実現した。ハンド、バケットやグリッパ先端からは離れた位置で伝播振動を計測することで、環境とセンサが直接接触することを避けた頑強性をセンシングシステムに与えた。また、伝播振動を計測するため、センサを筐体表面に取り付けるのみで運用可能であり、従来の建設機械や既存のロボットなど様々なロボットプラットフォームに対し、改造を加えることなく後付けでの適用が可能となっており、建設ロボットに限定せず幅広く利用可能なシステムである。また、力覚センサなどに比べ非常に安価にシステムを構築することができるのも特徴の一つである。図2-6-28に、建設ロボットに適用した触覚センシングシステムを示す。



図2-6-28 双腕建設ロボットに搭載した触覚センシングシステム

2-5-3) 操縦インタフェースによらず利用可能な触覚ディスプレイシステム

計測した振動触覚情報を操縦者に提示する触覚ディスプレイシステムでは、ボイスコイルアクチュエータを搭載し、振幅と周波数を独立に制御することで、センシングシステムによって取得した振動波形を忠実に再現することができる。

また、ディスプレイシステムの無線化および双腕化も実施した。波形を生成するPCからオペレータには無線で触覚情報が伝達される。これによって、オペレータの作業を妨げないウェアラブルなシステムを実現した。さらに、触覚ディスプレイをリストバンド型とすることで、力覚インタフェース、ジョイスティックなど様々なインタフェースと併用可能である。前述の触覚センシングシステムと同様、既存の操縦システムに改造を加えることなく後付けで適用可能であるという特徴を有している(図2-6-29)。2018年11月のフィールド評価会では、振動子のアンプモジュールを小型化

し無線受信機と合わせて前腕部に装着可能とした。図2-6-30にオペレータが触覚ディスプレイシステムを装着した様子を示す。



図2-6-29 様々な形態のインタフェースに適用可能なリストバンド型触覚ディスプレイ

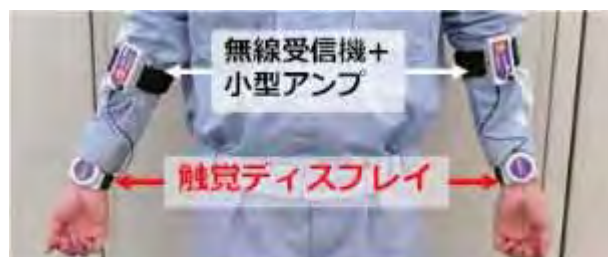


図2-6-30 前腕に装着可能な無線受信および小型アンプモジュールと触覚ディスプレイ

2-5-4) 高周波振動をヒトが知覚しやすい振動へと変調する信号処理手法

建設ロボット筐体で計測された高周波振動は、エンジンの駆動などによる比較的定常的なノイズを含むとともに、ヒトが知覚し易い周波数帯域よりも高い高周波成分を含むことが多く、オペレータに伝送する前に接触に関する情報を抽出する処理が必要となる。

まず、ノイズ除去に関して、計測振動の周波数成分からあらかじめ計測しておいたノイズ振動の周波数成分を差し引くことで信号を抽出する。つぎに、高周波振動の包絡線に着目した強調処理を適用する。ヒトが振動の特徴を知覚する上で、包絡線が重要な因子であるという報告に基づいており、提案手法では、包絡線を維持しつつ、内包する振動の周波数をヒトが知覚しやすい周波数へと変調する。図2-6-31に提案する信号処理手法の流れを示す。前述のノイズ除去処理を適用した振動から包絡線を抽出する。そして、この包絡線が内包するように振幅を変調した正弦波を生成する。このとき、内包する正弦波の周波数、キャリア周波数を感度の高い周波数とすることで、ヒトが知覚しやすい振動へと変調する。

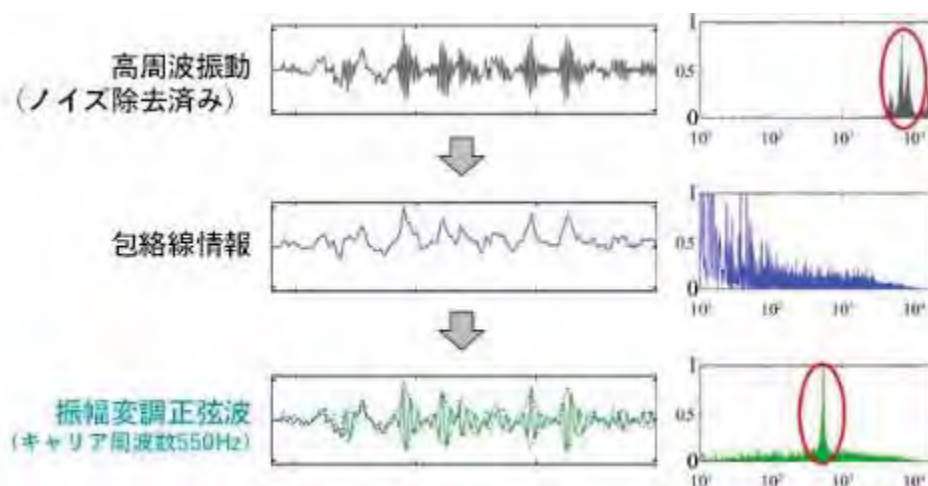


図2-6-31 ヒトの知覚特性を考慮した振幅変調に基づく信号処理手法

2-5-5) 触覚提示システムの評価

複数回実施してきたフィールド評価会において、構築したシステムを建設ロボットに統合するとともに、提案する信号処理手法の有効性のユーザ評価を行ってきた。

まず，研究室環境で，エンドエフェクタに見立てたシャベルが地面を水平方向に掘削した際の振動情報を，提案手法によってエンドエフェクタに発生した振動を伝達し，掘削対象の砂利の粒度の違い，および，エンドエフェクタの移動速度の弁別能力が向上することを確認した．また，通常の油圧ショベルに提案のセンシングシステムを搭載し，地面を掘削した際の振動を記録し，提案手法で処理した振動情報を提示した際の主観評価を行った結果，地面を掘削した際の質的評価，主観的強度，および操作の非妨害性などが向上することを確認した．

さらに，繊細な作業に対するシステムの有効性を定量的に評価するため，3名のオペレータを対象とする評価実験を実施した．評価実験のタスクは，図2-6-32に示すように，ハンドで把持した鉄筋をコンクリートブロックに挿入し，目視外の壁面に鉄筋先端が衝突したと判断したタイミングで鉄筋を離すという，視覚情報の寄与が小さいタスクである．評価項目は，操縦の繊細さを評価するための衝突時の力と，効率性を評価するためのタスクに要する時間とした．実験に参加したオペレータは，建設ロボットの操縦経験者3名でうち1名は熟練者であった．実験条件は，触覚提示なしの条件と，ノイズ処理振動の条件と，提案手法であるノイズ処理と高周波振動変調の条件の3条件とした．タスクに要した時間に関しては有意な差は確認できなかったが，衝突時の力のピークについては条件間で有意な差が確認された．図2-6-33にオペレータ3名の結果を示す．オペレータA（熟練者）については，提案手法の条件の値が小さくなる傾向は確認できるが，有意差は確認されなかった．しかし，オペレータBとCにおいては，提案手法を適用した条件の値がほかの条件に対して有意に小さいことが示され，触覚伝達によって繊細な操縦が可能となることが示された．



図2-6-32 鉄筋のブロックへの挿入タスク

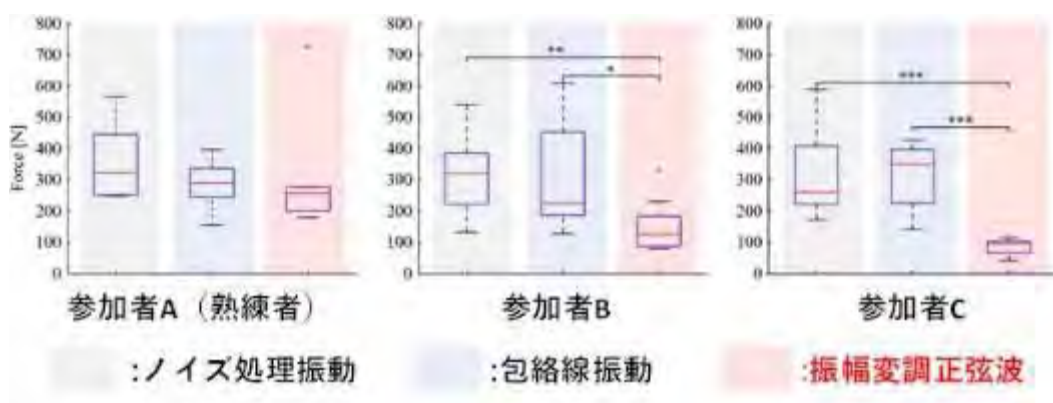


図2-6-33 提示波形による鉄筋挿入時の衝突力ピーク値の変化

2-6) 遠隔操作インターフェース

建設機械の遠隔操作の先行技術である無人化施工システムでは，遠隔地の映像情報の提示にマルチモニタシステムが使われる(図 2-6-34)．これは市販のディスプレイを組み合わせで構築できるので簡便ではあるが，映像の切り替えが煩雑で，広視野の映像の提示が困難であり，オペレータに現地の状

況を伝えるには不十分である。また無人化施工システムが、災害の発災からある程度時間が経過してから導入されるのに対し、本プロジェクトの建設ロボットでは、発災後の比較的早い時期から投入できることを目指している。このためにはロボット本体はもとより、遠隔操作システムも搬送が容易であることが求められる。これらのことから建設ロボットでは、新しい遠隔操作・映像提示システムの開発を進めてきた。



図 2-6-34 無人化施工システムに用いられるマルチモニタ

建設ロボットは、遠隔操作で自在な移動や作業が行えるよう、全周囲カメラ・アーム先端カメラ・赤外線カメラ・疑似的に真上からの視野を再現するアラウンドビューカメラ・実際に上空から撮影する有線ドローンカメラなど、多数のカメラを搭載している。遠隔操作コクピットは現場付近の安全な場所に仮設され、ロボットとは無線通信で結ばれる。遠隔操作コクピットにはロボットから送られた各カメラ映像が表示され、オペレータはこれを見ながら操作を行なう。そのため遠隔操作コクピットは、効果的な映像提示がなされるよう設計する必要がある。

広視野の映像を提示すれば、あたかも自分がそのロボットに搭乗して現場にいるかのような視空間が再現される。それにより視覚情報が増加することで作業性が向上するだけでなく、臨場感が向上し、方向感覚の喪失や空間識失調の防止が期待できる。広視野の映像を継ぎ目なく表示するために、曲面への投影による没入型スクリーンが有効である。しかし、建設ロボットで表示される映像は、視点から数メートル以上の遠景が主であるため、それに対してスクリーンが近すぎると、不自然さや眼精疲労をもたらす。特に3D表示したときには輻輳調節矛盾による問題が生じる。これを解消するには、画面との視距離を1～1.5m以上とする必要があるため、広い視野を得るためにはスクリーンを大型化せざるを得ない。このようなスクリーンにはプラスチックインジェクションの成形品や、金属等を可塑変形させたものが用いられるが、重く、畳むことができないため、移動させることが困難となる問題があった。

以上から、建設ロボットプラットホームの遠隔操作コクピットに求められるスクリーンの要件を以下のように整理した。

- (1) 視点からスクリーンまでの十分な視距離。
- (2) 水平方向および下方向に広い表示視野。
- (3) 補助画面の自在な配置
- (4) 分解、移動・運搬が容易な可搬性。

本プロジェクトではこれらの要件を満たす新しい曲面スクリーンを提案し、遠隔操作コクピットを構築した。新しい曲面スクリーンの構成方法として、可撓性のあるプラスチックの平板を円筒状に弾性変形させてフレームに固定しスクリーンとする方法を考案した(特許出願)。スクリーンの構造を図2-6-35に示す。

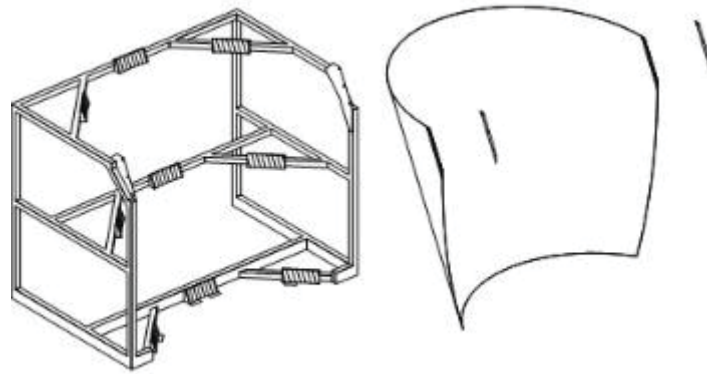


図 2-6-35 スクリーンの構造

半円筒型に弾性変形させた平板の上部両端を押さえ金具とボルト留めによってフレームに固定しスクリーンとする。2 点が固定されることで、全体の形状がほぼ定まるが、さらに形状を安定されるための補助として背面の 9 箇所にプラスチック製のガイド、最下部には金属製のストッパーを設けた。弾性変形の復元力により全体にわたって連続した曲面をなすので滑らかな表示面が形成される。また、使用者からみて奥へ向かって傾斜させている。その角度は鉛直に対し 26° とした。スクリーンは厚み 3mm のポリカーボネート製で、表面をブラスト仕上げとすることで反射を抑制して投影面としている。円筒の半径は 900mm であり、高さは 1500mm である。軽量であるため、組み付けや取り外しが容易であり、取り外して、さらに小さな筒状に丸めることが可能であり、運搬も容易である。

図 2-6-36 に想定される視点における視野の模式図を示す。視点の高さでの水平視野角は 133° である。円筒を傾けたことにより、重要度の低い上方視野を減らす代わりに、下方向へ 56° の非常に広い視界を実現している。また、視点からスクリーンまでの視距離は正面において 1400mm と十分である。汎用的な没入型スクリーンは球面をなすものが多い。それに対して提案手法では単純な円筒形であっても遠隔操作に十分な性能を有している。さらに、スクリーンを傾斜させたことによる効果として、下から上へ視線を動かすにしがたって焦点距離が遠ざかる関係がほぼ保たれる。これはヒトの持つ生理的反射に適っているため、眼精疲労を起こしにくいと考えられる。また、球面スクリーンでは音が内部反射して響き、使用者に不快感を与えることがあるが、本スクリーンは円筒形状のため音が上部へ抜け、不快感を低減している。

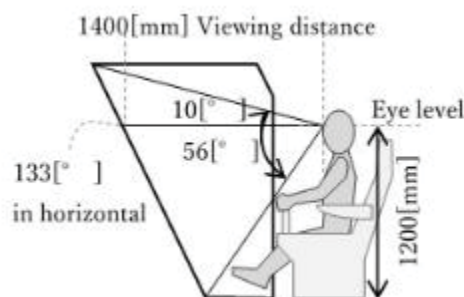


図2-6-36 スクリーンの視野

映像投影は 4 台のプロジェクタで行う。投影面を上下・左右の 4 領域に分け、それぞれのプロジェクタに割り当てた。フロントプロジェクションであるが、オペレータによる影が生じないように上方から投影する。装置の高さを抑えるため、投映像は表面鏡で折り返している。領域境界には映像にエッジブレンディングを施している。

ロボットに搭載された各カメラで撮影された映像は、無線通信を介して、HDMI 信号などの映像フォーマットでシステムへ送られる。そして画像キャプチャボードを介して PC に取り込まれる。スクリーンへの映像表示は PC により制御される。

ロボットに搭載した全周囲カメラの映像がメインの映像となるが、その映像はオペレータに遠隔地の映像をあたかも素通しの窓を通して見ている様に、正しい方位・大きさを提示されるのが望ましい。そのためにはスクリーンが曲面であることによる歪みが除去(キャンセル)された映像が提示されなければならない。このための映像補正には自由曲面投影ディプレー技術を用いた。PC は取り込んだ映像を補正し、各プロジェクタが投影すべき映像を逐次算出する。その結果がプロジェクタに出力され投影されることで、遠隔地の映像が実時間でスクリーンに表示される。

また、ドローンカメラなどの映像についても同様に処理され、複数を同時に表示することができる。継ぎ目のないスクリーンであるため、任意の位置や大きさを配置したり、整列したりすることが可能である。各映像のレイアウトは任意に変更できるが、アイマークレコーダを用いて操作中のオペレータの視点を計測し、視線移動ができるだけ少なくなる配置を工夫している。また Texas A&M University の Robin R. Murphy 教授から、多画面表示の操作システムについて、提示画像の優先度の考え方、映像の位置や重なり、その他人間工学的視点からの改善点などに対するアドバイスをいただき、これを反映させている。その検討の一例を図 2-6-37 に示す。



図 2-6-37 多画面表示検討例(Robin Murphy 教授による。システムは初期バージョン)

この曲面スクリーンとロボットのアームを操作するための覚フィードバック機能を有する操作レバー、走行などを操作する操作ペダルを組み合わせることで遠隔操作コクピットを構築している。装置の外観と操作の様子を図 2-6-38 に示す。



図 2-6-38 遠隔操作コクピットの外観と操作の様子

2-7) 失敗時リカバリ・耐故障性向上

ロボット故障時に、残存機能を用いてパフォーマンスを維持するための強化学習による機能縮退手法を提案し、シミュレーション上で動作を確認した。しかし、この機能縮退手法は、事前に故障個所の情報を与える必要があるが、将来的なシステムの実環境への導入を考えたとき、故障の発生と部位はロボットが感知する必要がある。そこで、指令値と各センサの出力結果を比較し、故障個所を特定する手法を提案した(図2-6-39)。故障発見システムでは、指令値とVisual odometry, エンコーダおよびIMUの値を比較し、それらの値の差によってモータやエンコーダなどの破損を発見するシステムを提案した。

また、他の手法として電装系モジュールに小型の故障診断デバイスを実装する分散型故障診断システムを提案した。従来の故障診断システムは故障観測用センサと診断用コンピュータが中央集権的に構成されており、そのコンピュータの故障により診断機能が無効化される可能性が高い。その対策として、単に故障診断用コンピュータの多重化では、移動ロボットへのペイロードや故障診断用電源系統のバックアップ等を考慮すると、既に運用されているロボットへの実装が難しい。そこで、既に運用されている移動ロボットへの故障検知診断システムの実装を対象として、コンピュータの小型化や省電力化に着目する。モータドライバやコントローラなどのそれぞれの電装系モジュールに小型の故障診断デバイスを実装する分散型故障診断システムを提案した。どちらの手法も既に運用されているロボットに後付けできる故障診断装置となっている。

リカバリモーションはそのロボットにとって想定されていない動きが必要になることもあり、オペレータが指示することは容易ではない。そこで、リカバリモーションを故障部位ごとに生成する必要がある。リカバリモーションの生成には強化学習を用いる。ロボットの転倒のしづらさと移動距離に対して報酬を用意し、各関節へ与える値を学習した。物理演算シミュレータによるリカバリモーションの学習の結果、単腕型、双腕型ロボットによるリカバリモーションの生成に成功した(図2-6-40)。

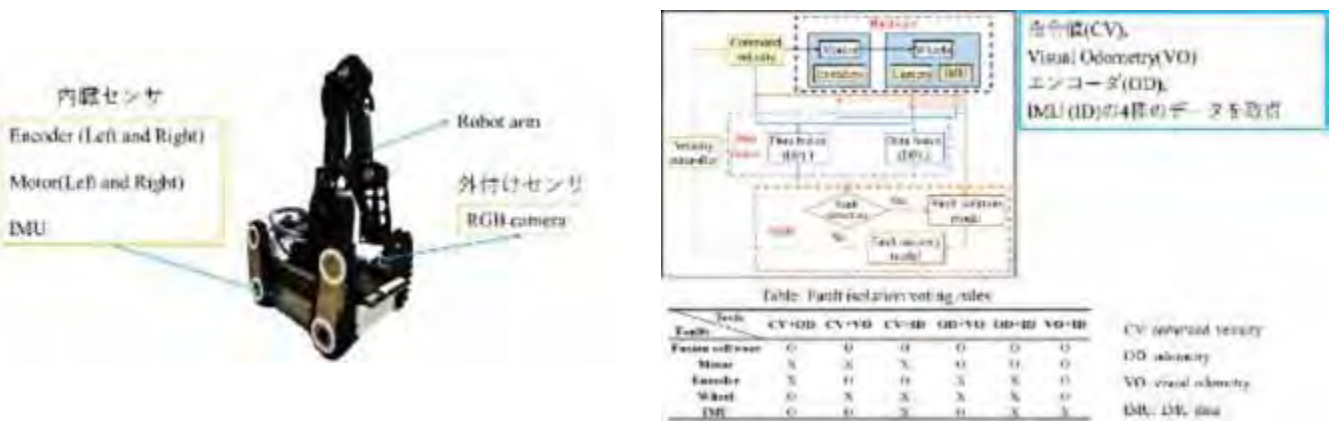


図2-6-39 故障発見

(左：使用したロボットとセンサ，右：指令値と各センサの出力結果の比較による故障発見)

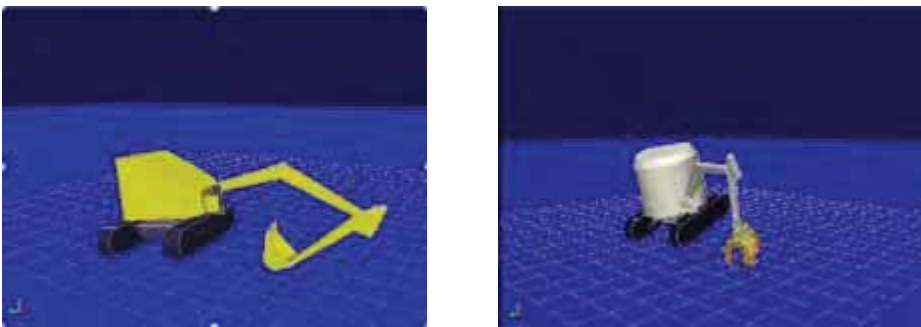


図2-6-40 リカバリモーションのシミュレーション(左：単腕型ロボット，右：双腕型ロボット)

2-8) 吸着コンポーネント

開発の吸着コンポーネントの特徴は、

- ・表面形状・性状に対する高い適応性を持つ分離型の構造
 - ・多様な負荷に同一の設計指針を適用できる結合構造
- の2点である。

図2-6-41に示すように吸着コンポーネントは吸着部（吸着機構）と保持部（保持機構）に分離されている。吸着部は表面の形状によるうねりや凹凸に対して柔軟になじむことで吸着力を安定して発生させることができる。保持部は吸着部で発生した吸着力を使い対象を面でとらえるための3本の爪を有しており、対象面に付着した液体等を押しのけて対象に接することができる。したがって、図x1に示すような対称面のほか水や油が付着した表面にも対応することができる。

吸着コンポーネントの高い適応性を損なうことなく多様な負荷に対応するためには単純に吸着コンポーネントを大きくする方法では限界があり大きくするほどうねりに対応することができない、そこで図2-6-42に示すように吸着部と保持部を分離する構成を拡大し複数の吸着コンポーネントを結合し吸着部に見立てることで大きな負荷に対応する吸着コンポーネント（中スケール）とする構成とした。この方法であれば中スケールの吸着コンポーネントさらに結合することで大きな負荷に対応する吸着コンポーネントを設計することも可能となる。

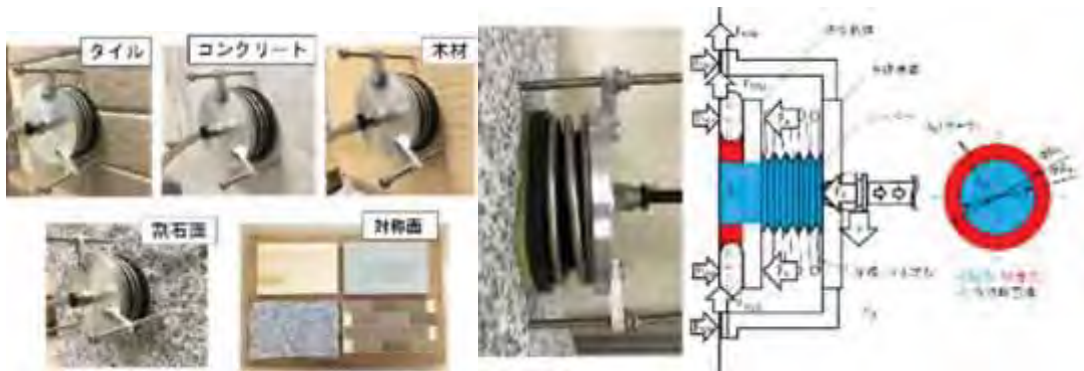


図 2-6-41 単体の吸着コンポーネント（小スケール）と吸着原理



図 2-6-42 複数結合手法による中スケール吸着コンポーネント

図2-6-42に開発した中スケールの吸着コンポーネントを示す。図2-6-43では表面にうねりや微小な凹凸を持つ石材のパネルを持ち上げることができており、小スケールの吸着コンポーネントの適応性を損なうことなく結合できていることが確認できた。また、吸着コンポーネントの上部には制御ボックスを搭載しており、外部からの吸着開始、停止といった単純な信号で動作するように構成することで、簡便に利用可能な吸着ハンドとしている。

開発の吸着コンポーネントは図 2-6-44 に示すように保持部を有することで①，②で水平に持ち上げたパネルを③，④で垂直にして物体の位置決めを行っており，パネル組み付けのような作業に適用できることが確認できた。



図 2-6-43 吸着コンポーネントによる石材パネルの持ち上げ

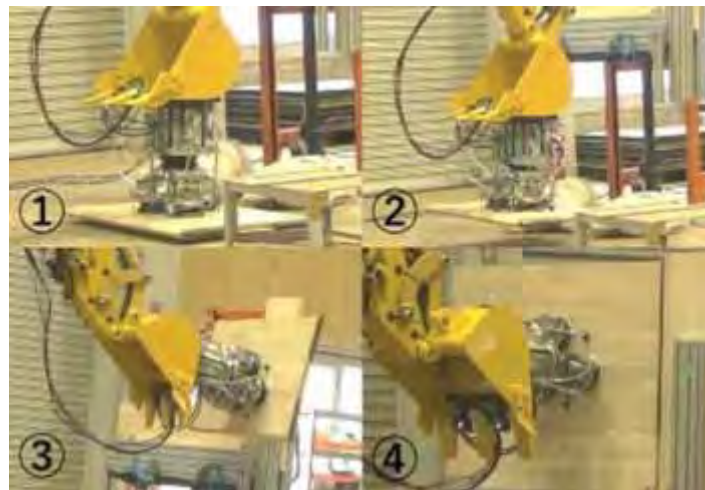


図 2-6-44 吸着コンポーネントを用いたパネル組み付け

3) 成果の活用

3-1) 建設ロボット本体

- ・ 平時の土木建設工事への適用についてゼネコンXX社と検討を続けている。
- ・ 鉄道関係XX社より，電車線(架線)工事への適用について相談があり，適用の検討を行った。
- ・ 産業機械関係XX社より，工場内での重量物ハンドリング・組立機への適用について相談があり，適用の検討を行った。
- ・ 本プロジェクトで開発した遠隔操作コクピットの映像投影システムは，建設機械メーカXX社の次世代遠隔操作ステーションへの適用に向けて，同社で研究開発が行われる計画である。

3-2) 有線給電ドローン

- ・ 開発した技術は，2018年のジャパンドローン展に出展した際，多くの方から反響があった。特に，橋梁下における点検を検討している業者は，GNSSの誤差が生じない有線給電ケーブルによる位置推定の技術に興味を持っており，このシステムの販売予定に関する質問を受けたこともあった。

・一方、XX社より、ヘリパッドの張力調整機構に関する技術提供依頼があったため、その部分の技術を提供した。その業者は、本研究で製作した張力調整機構を利用した有線給電ドローン用ヘリパッドを開発し、東北大学と協力しながら、このドローンの研究開発を進めている。

3-3) 極限画像処理

A) 半隠消映像システム

・清水建設株式会社と建機の作業中の作業対象の建機自身による隠れの問題に対して共同研究を行った。この問題に対して、ImPACT の成果である半隠消映像システムを適用し、建機の操作において有効であることを確かめることができた。

B) マルチモーダル画像融合による極限センシング

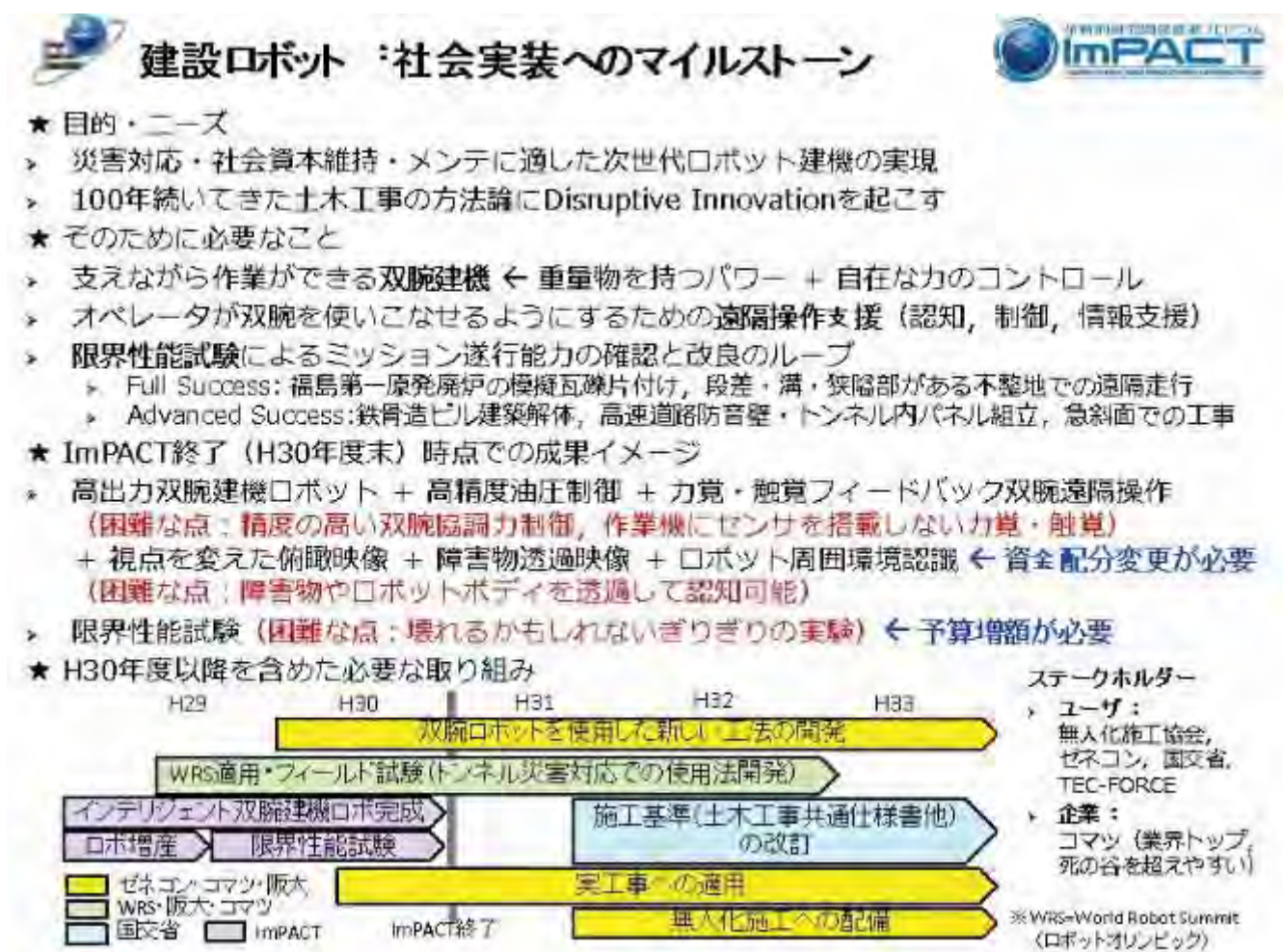
・可視・遠赤外線同軸カメラシステムに利用した防塵対策について、韓国の研究グループから相談を受けた。また、日本国内の他の研究グループが、同様の可視・遠赤外線同軸カメラシステムを利用し、研究を行っている。

・ImPACT の研究で開発した煙環境模擬装置を、日本電気株式会社が研究開発に利用し、その結果をプレスリリースしている。なお、そのプレスリリースには ImPACT の技術が活用されている旨のクレジットが入っている。

3-4) 吸着コンポーネント

・開発した技術はメッセナゴヤなどの技術展示において不定形状のワークを把持するハンドとして問い合わせをいただいている。一部の企業については直接ハンド応用の相談があり、適用を検討している。FA分野においては多くの適用対象があり技術応用が期待できる。

社会実装を進めるために、下記のようなマイルストーンを定めた。



1) サマリー

その結果、次の特徴ある油圧コンポーネントが実現できた。1)低摺動・高出力油圧シリンダ・モータ(従来の3~6倍の高「力/質量」比, 1/3~1/10の低摺動), 2)小型高効率パワーパック, 3)小径高压油圧ホース・継手, 4)高出力人工筋(シリンダに比べて約7倍のEDM7), 5)微粒子励振バルブ(小型, 軽量, 新動作原理), 6)ハイブリッドブースター。

2) 技術的成果

2-1) 低撓動・高出力油圧コンポーネント

2-1-1) 35MPa対応タフ油圧アクチュエータ

キャップカバー
ロッドカバー
ピストンロッド
プラッシュ
ロッドワッシャー
ロッドパッキン
シリンダチューブ
ピストンパッキン
クッション弁
チェック弁
タイロッド

図 2-7-1 JIS 規格シリンダの構造概要

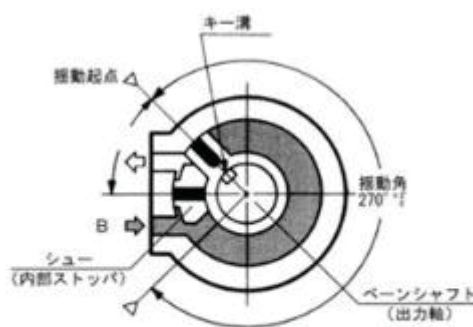


図 2-7-2 旋回角度 270 度の 1 ペーン
揺動モータの構造概要

これらの課題に対し、新軽量合金の使用などにより、軽量かつ常用使用圧力35MPaの高圧化を実現した。さらに、摺動抵抗の低減に関しては、アクチュエータのパッキン構造と材質の選定、また摺動部における軽量合金部品の加工面粗度、各種寸法公差、切削温度の厳格な管理等の工夫を行った。

A) シリンダ

221



図 2-7-3 多軸鍛造マグネシウム合金による
小型軽量・高出力低摺動シリンダ
（サーボ昇搭載，最大推力 11 kN）



図 2-7-4 チタン合金による軽量・高出力シリンダ
（最大推力 24.5kN）

本シリンダは図2-7-5に示すように， JISシリンダおよびISO規格品に対し，出力密度（最大推力/アクチュエータ自身緒の質量）を数倍向上させることに成功した．

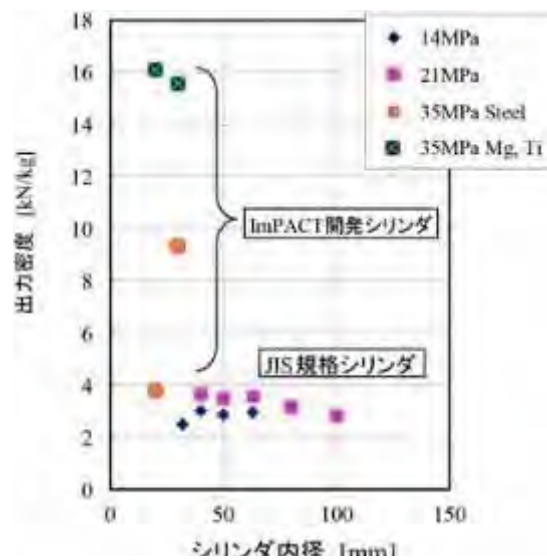


図2-7-5 開発シリンダとJIS規格品の比較

多軸鍛造マグネシウム合金によるシリンダの摺動圧力の測定結果を図2-7-6に示す．

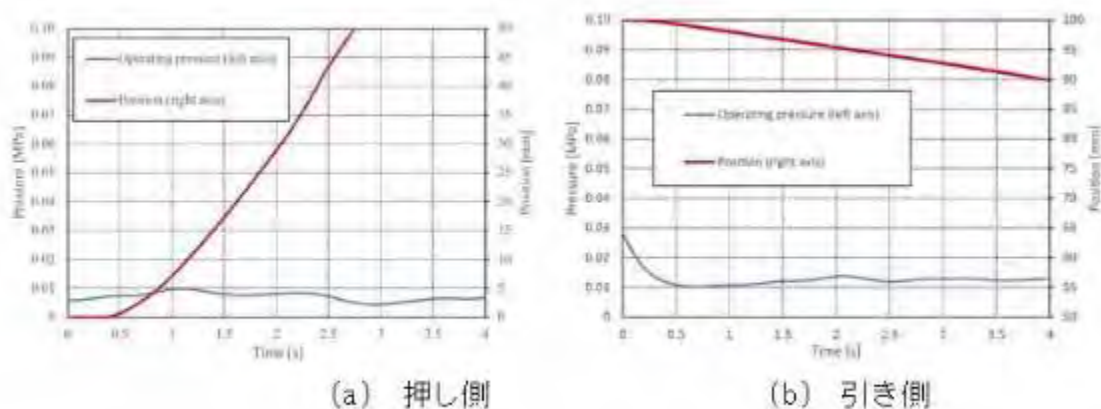


図2-7-6 シリンダの摺動圧力の計測例

摺動圧力の測定は図2-7-4に示したシリンダ単体の評価を行ったものであり，無負荷作動時の摺動圧力をフルストロークである100 mmで計測を行った．図2-7-6 (a)，(b)はそれぞれピストン押し出し

側，引き込み側の作動圧力とピストン変位を同時計測したものである．ピストン両端での圧力上昇はあるが，作動中の圧力はおおよそその範囲でおよそ0.01Mpa程度以下であり，既存のシリンダと比較して非常に小さい値となっている．

B) 油圧揺動モータ

早稲田大学で研究開発が行われている脚ロボットの有限回転軸での仕様を想定して開発しているシングルベーン油圧揺動モータ二種類について述べる．このモータは一般的に使われている揺動モータに対して小型軽量，高耐圧，低摺動化を目指して開発を行い，材料に純チタンを用いる．一般的な揺動モータを小型化して用いる場合，本体の固定方式や出力形式，配管方法など，ロボット用途としては不便な部分がある．そこで，図2-7-7に示すような構造を採用した．

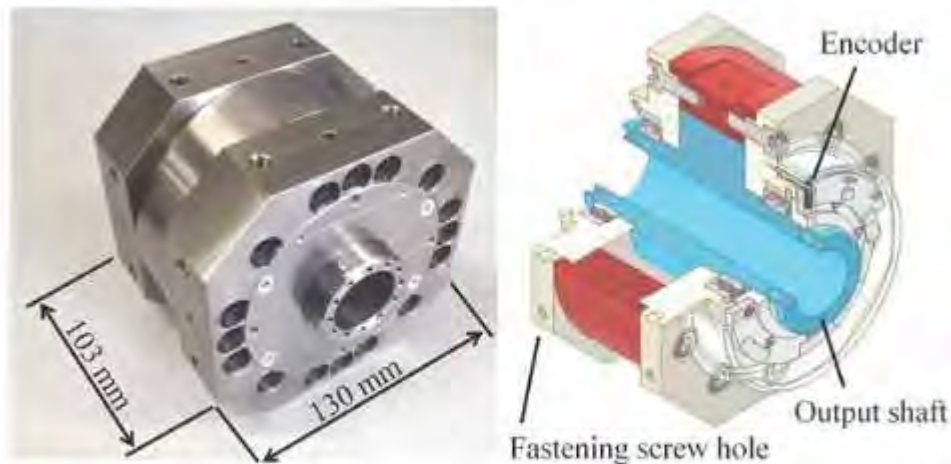


図2-7-7 Picture and sectional view of medium output semi-rotary motor

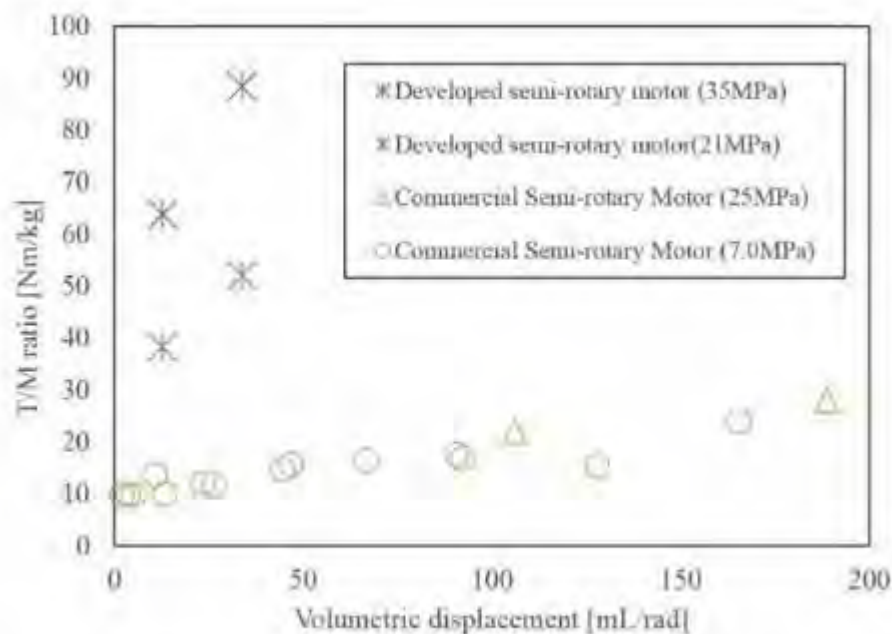


図2-7-8 Comparison of T/M ratios with general semi-rotary motors

本方式では，出力軸を大径，中空化し，軸端面を直接フランジとして利用するものである．これにより，固定が容易になるだけでなく，フランジ部品の省略や小型，軽量化も行なうことができ，中空径を配管に利用することもできる．アクチュエータの定格トルクと自重の比であるT/M比を市販シングルベーン揺動モータと比較すると，大出力モータが同規模のものに対して5.6倍，中出力モータは

4.7倍となる高いT/M比を達成している(図2-7-8)。

C) ピストンモータ

無限回転軸には斜板アキシャルピストンモータに減速器を組み合わせたものの中、小二種類をKYB、タカコと共同開発して用いる。このモータを図2-7-9に示す。



図2-7-9 Small output swash plate axial piston motor

ピストンモータは、タカコの既製品を改造して小型軽量化、高耐圧化、高回転化したものである。減速器は横浜国立大学で開発された歯形をもとにKYBが製作した遊星歯車減速器であり、従来のものより低摩擦である。衝撃に弱い減速器を用いるが、油圧モータで駆動する場合元のトルクが大きいため減速比を低くすることができる点や、バックドライバビリティの比較的高い遊星歯車減速器である点、衝撃を受けることの少ない腕の捻り方向としての使用である点から、問題にはならないと考える。アクチュエータの定格トルクと自重の比であるT/M比を市販シングルベーン揺動モータと比較すると、大出力モータが同規模のものに対して6.9倍、中出力モータは8.2倍となる高いT/M比を達成している。

D) 評価実験

開発した油圧アクチュエータについて、圧力によるトルク推定を行なうための評価実験を行なった。発生トルク計測では、アクチュエータの最大トルク、印加圧力と発生トルクの関係性を計測した。実験の模式図を図2-7-10に示す。図2-7-10のように、モータに取り付けたアームによる推力をロードセル(LUK-A-20kN, 共和電業製)で計測する。また、モータ正転、逆転の切り替え部分である印加圧力0 MPa付近での計測をがたの発生なく行なうため、アーム先端に重りを取り付け、常にロードセルに圧縮力を加えた状態で実験を行なう。アクチュエータ各ポートへの印加圧力の差を、サーボバルブ(HS210, PSC製)とバルブドライバ(CA250-003-001, PSC製)、圧力センサ(NAT400.0A, Trafag社製)、DSP(DS1104, dSPACE社製)により制御し、計測を行なった。指令電圧にはバルブドライバの機能によりディザを与える。圧力指令は0.05 Hzの正弦波で行い、3周期分を計測して1 Hzのローパスバタワースフィルタで処理する。ただし、制御する圧力範囲は重りが浮かない範囲内にとどめる。

揺動モータについては、ストローク端と中央の2箇所について測定を行なった。大出力揺動モータの結果を図2-7-11に示す。ストローク端の結果では比較的高いヒステリシスは小さく、最大差圧20.7 MPaの際のトルクは651 Nmと設計値よりも大きい。一方、ストローク中央付近の結果でもヒステリシスは小さいものの、差圧11 MPa以上では発生トルクの上昇が緩やかになっている。また、最大差圧20.1 MPaでの発生トルクは518 Nmであり、設計値を下回っている。これは、開発した揺動モータがシングルベーン式であるためベーンがストローク中央にある場合、内圧による出力軸ベアリングへの負荷が大きくなるのが原因として考えられる。発生トルク変動はベーン位置から予測することができ、圧力によるトルク検出を行なう際には角度も利用する必要があることがわかる。

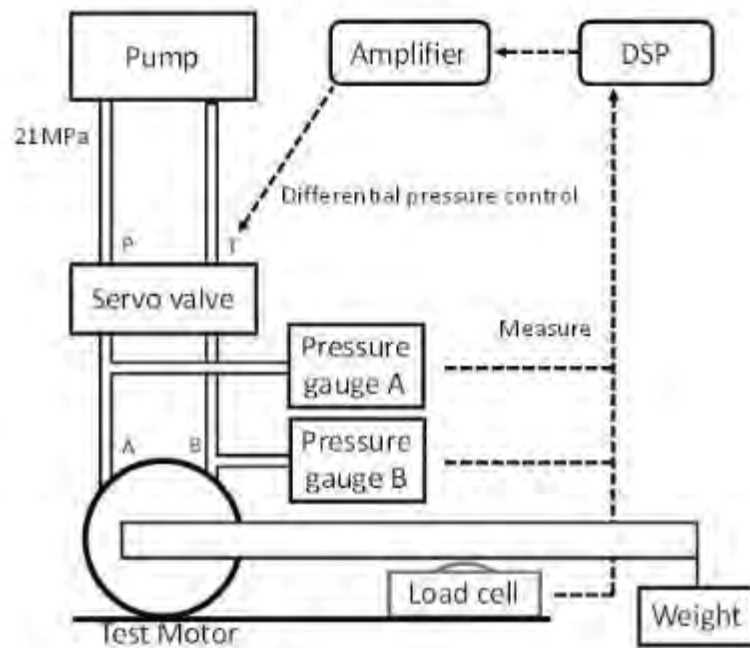


図2-7-10 Schematic diagram of experiment

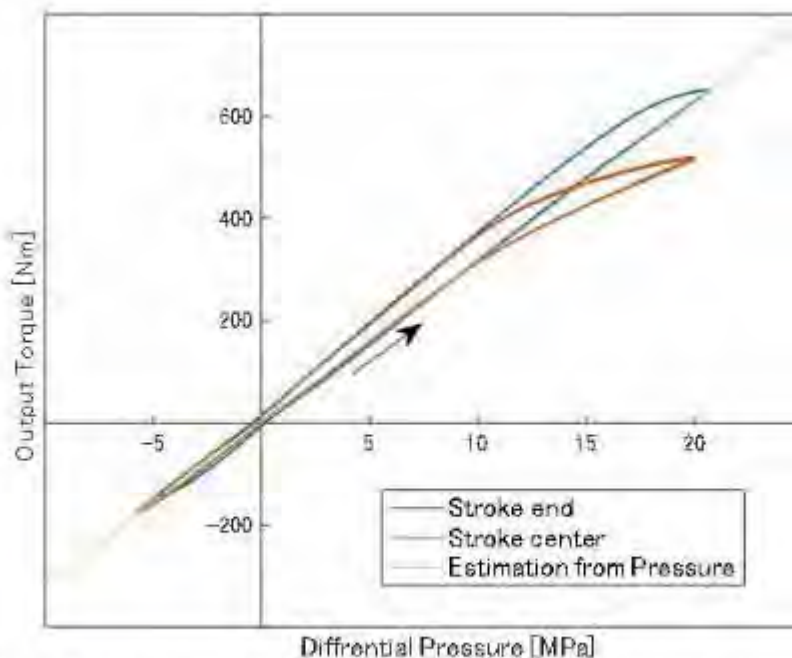


図2-7-11 Relationship between differential pressure and output torque of high output

ピストンモータについては、一箇所で測定を行なった。小型ピストンモータの結果を図2-7-12に示す。図のように、大きなヒステリシスが発生している。ピストンモータ単体ではこのようなヒステリシスが現れることは無いため、減速器による影響が大きいと考えられる。原理上ピストンモータにおいても内部のピストンへの印加圧力からの発生トルク推定は可能であるが、このモータについては圧力からの力推定は困難である。また、発生トルクも差圧19.3 MPaで87 Nmであり、外挿により21 MPaの発生トルクを求めても90 Nm程度であり、設計値の130 Nmに届かない。ただし、メーカーによるモータの連続回転時の計測値(図2-7-13)では16 MPaまでの実験の外挿から設計値の達成が予測される。また、このときの時刻歴データの一つを図2-7-14に示す。図のように、連続回転中であればトルク変動は少ないことから、連続回転中であれば十分なトルクが得られ、圧力からのトルク推定も可能だと考

えられる。ピストンモータの適用箇所は手首と肩のひねり軸であり、この軸で力制御が必要とされる用途は、プラント内バルブの開閉である。このような動作の際には、事前に関節を回転させながらハンドルに接触させることや、エンコーダの値も制御に用いることでこの問題を回避できる。]

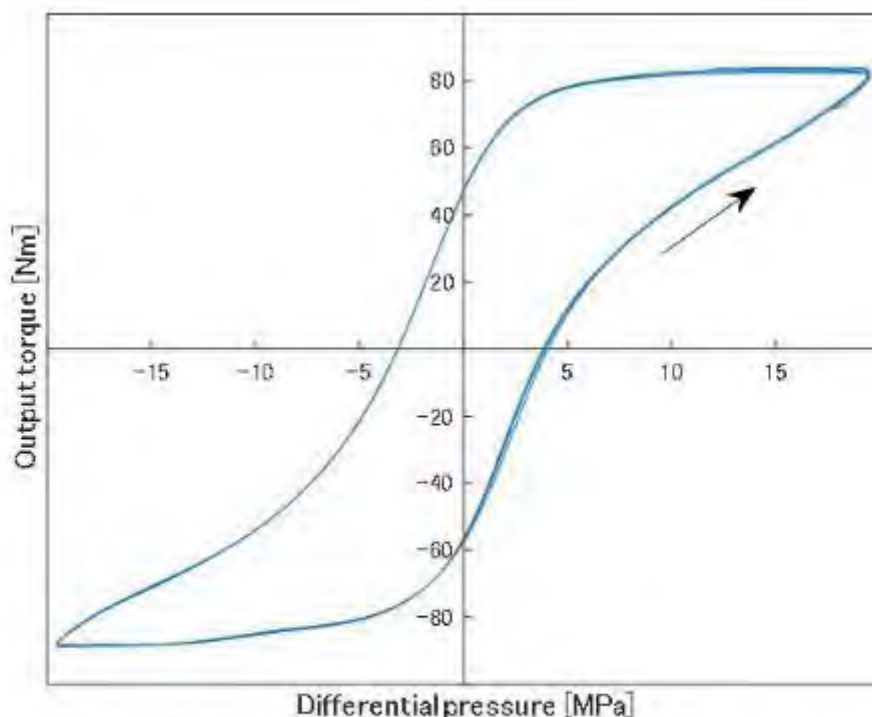


図2-7-12 Relationship between differential pressure and output torque of small output axial piston motor

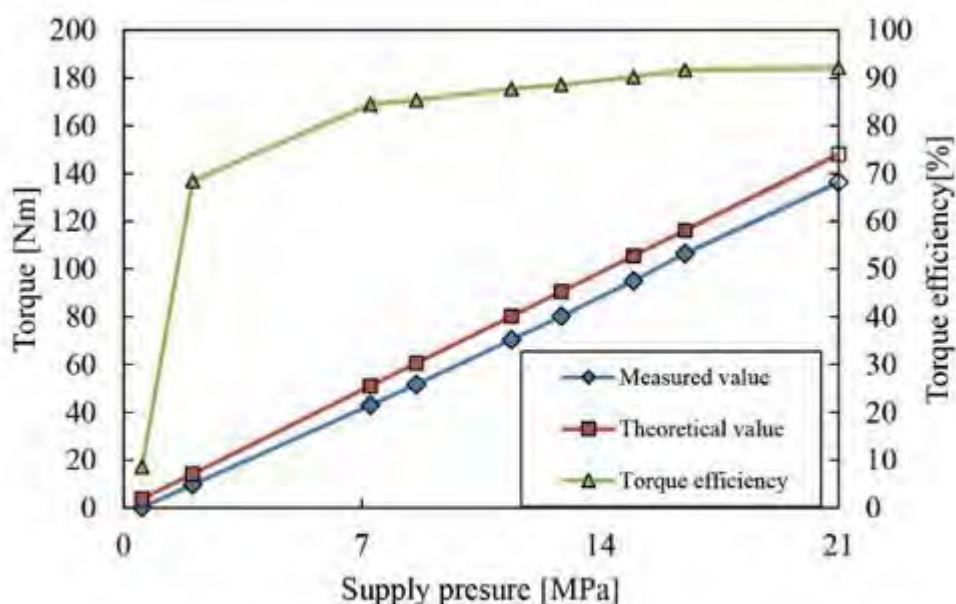


図2-7-13 Measured torque while continuous rotation

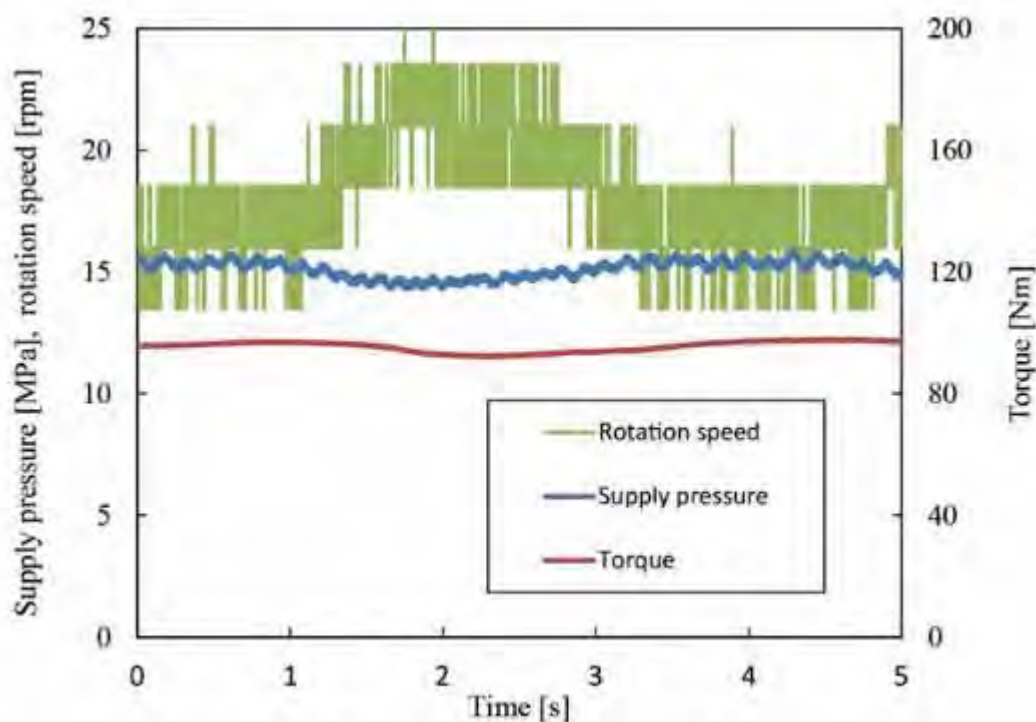


図2-7-14 Time history data of torque measurement

2-1-2) ロボット用油圧パワーパック

油圧システムでは、大きな油圧動力を油圧アクチュエータに供給する必要があるため、高圧の油圧ポンプを電動モータ、エンジン等の原動機で駆動する。この油圧ポンプ、原動機、および油圧制御弁を含む補器類を一体、あるいは2分割程度にまとめた油圧パワーパックが油圧ロボットの駆動には必要となる。図2-7-15及び図2-7-16に開発したエンジン式パワーパックの油圧回路及び試作機の写真をそれぞれ示す。

本油圧パワーパックは適用対象として、ImPACTのロボットプラットフォームの一つである早稲田大学で開発している脚ロボットを想定している。電動モータをアクチュエータとして用いる場合、一般に電源ケーブルにより、外部から電力を供給するタイプでは、ロボットの稼働範囲が制限される。そこで、外部から供給される商用電源で電動モータを駆動して油圧動力を発生、供給する油圧パワーパックを開発するとともに、ロボット搭載のバッテリーの電力、または化石燃料等のエネルギー源を油圧動力に変換し、油圧アクチュエータに供給する自立型油圧パワーパックの開発も行っている。これにより、油圧ロボットの稼働領域の拡大を実現する。なお、基本仕様として、小形、軽量で大出力を得るため、吐出圧力を瞬間最高圧力35MPa、連続最高圧力21MPaとしている。パワーパックの油圧回路図を図2-7-15に示す。

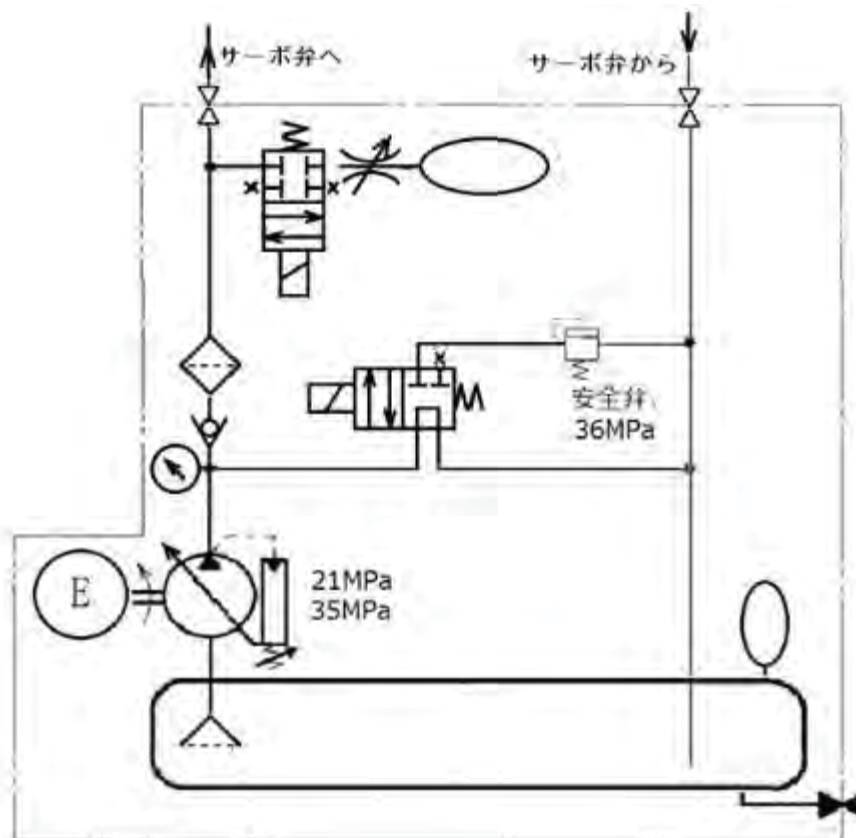


図2-7-15 パワーパックの油圧回路図



図2-7-16 エンジン式パワーパックの一例

原動機は、前述のように電動モータ、またはエンジンを用い、基本的に一定回転でポンプを駆動する。起動時は無負荷状態で、回転安定後に負荷として、リリーフ弁が供給圧力の最大値を設定し、安全弁として機能する。ポンプ吐出流量は、チェック弁、フィルターを通り、負荷に供給されるが、吐出圧力がアキュムレータのプリチャージ圧力以上になると、余剰流量はアキュムレータにチャージされ、吐出圧力の上昇とともにアキュムレータへのチャージ量が増加する。ポンプは圧力補償機構により、吐出量を制御し、所定の圧力を維持する。一方、負荷流量が増大して吐出圧力が下がると、ポンプは吐出量を増加し、アキュムレータからも圧油が供給され、ポンプ最大吐出流量以上の流量が必要な場合は、不足分をアキュムレータで対応する。

油圧パワーパックのキー・コンポーネントの一つは、油圧ポンプである。小形、軽量の高圧ポンプとして最高使用圧力21MPaの斜板ピストンポンプが、(株)タカコ社により数年前からロボット用途にも開発されている。今回は、脚ロボットの動作パターンを基に、必要流量、圧力を検討し、押し除け

容積1.6cm³/revのポンプをベースに、最高使用圧力を21MPaから35MPa、最高回転数を3000rpmから5000rpmに向上させ、ポンプの最大出力が既存品の約3倍となるポンプを開発した。また、効率化のため、ポンプの可変容量化も行い、プロトタイプとして圧力補償機構付きのタイプを開発している。ポンプに搭載している油圧弁は、最高使用圧力35MPaのスイスWandfluh社製小形積層弁を、フィルターは大生工業(株)製の積層弁を用いている。

電動パワーパックとしては、外部からエネルギーの供給を受けるAC200V仕様の電動モータを原動機とするタイプ、及び搭載するリチウムイオン電池のシステムからエネルギーの供給を受けるDC100V仕様の電動モータを原動機とするタイプの2種を開発している。また、エンジン式パワーパックでは、排気ガス、振動、騒音等を考慮して、4サイクルのガソリンエンジンを原動機としている。各方式の特徴を表2-7-1にまとめる。

表2-7-1 パワーパックの原動機の3種の駆動方式とその特徴

	メリット	デメリット
電動モータ ＋ 外部電源	- 稼働時間に制限なし - ロボット本体の軽量化が容易	可動範囲が電源ケーブルによって制限される
電動モータ ＋ バッテリー	可動範囲が電源供給ラインによって制限されない	稼働時間の増加量に対するバッテリーの重量増加が大きい
エンジン	- 可動範囲が電源供給ラインによって制限されない - バッテリーに比べて稼働時間の増加量に対する重量増加が少ない	騒音や排ガス

3方式の油圧パワーパックはそれぞれの特徴があり、適用するロボットの使用環境や条件等により使い分ける必要がある。

2-1-3)小径高圧油圧ホース・継手

油圧装置における各機器との油路形成は電気制御系と比較して、利便性等の点で課題がある。特にロボットにおいては油圧配管やホースの油路接続による油漏れの懸念やホースの曲げ半径による配管経路の考慮などが問題となる。また、国内油圧機器のネジ接続はテーパネジであるためシールテープが必要となる。このため、シールテープが剥がれ管内に流失すると機器故障の原因になる。

この問題を払拭し、配管作業を簡略化するため、本研究では基本的にストレートネジを採用することにした。またロボットのアクチュエータ制御に高圧は必要であるが、流量は少ないため、管路の径は1/8インチ程度が多い。しかし、1/8以下の細径にて、常用35MPaのホース、継ぎ手は入手困難である。そのため、油圧ホース・継ぎ手メーカーと共同開発を行った。図2-7-17は開発したG1/8対応35MPaホースである。図2-7-18は35MPaスイベルジョイントであり(a)はG1/8 3軸用(b)は多軸用である。



図2-7-17 G1/8 35MPa油圧ホース



(a)



(b)

図2-7-18 G1/8 35MPa スイベルジョイント

これらのホース，継ぎ手を必要箇所に応じて使用することによって小型・高圧の油圧システムが構築できるものとする。

2-2) 高出力人工筋肉

2-2-1) マッキベン型人工筋肉の構造と特徴

タフロボットの実現を目指し，油圧駆動のマッキベン型人工筋肉の開発に取り組んだ。マッキベン型人工筋肉は1960年代に研究され，ブリヂストンによってロボット用アクチュエータとして実用化された。図2-7-19はマッキベン型人工筋肉の構造を示す。構造はシンプルで，ゴムチューブ，編み込んだ繊維から構成される。ゴムチューブ内部に圧力を印加することにより，径方向に膨張しながら，軸方向に収縮する。その振る舞いが筋肉に似ていることから人工筋肉と呼ばれる。代表的なアクチュエータであるモータ，シリンダと比較した場合，マッキベン型人工筋肉は，以下のような特徴がある

- ・軽量高出力（重量当たりの発生力が高い）
- ・柔軟性を持つ
- ・外部衝撃に強い



図2-7-19 マッキベン型人工筋肉の構造

2-2-2) マッキベン型人工筋肉の静的特性と本プロジェクトの目標

マッキベン型人工筋肉の評価方法については複数報告されているが，今回はSchulteの方法を適応した。Schulteによると，収縮力 F は次式で表すことができる。

$$F = \frac{\pi D_0^2 P}{4} \frac{1}{\sin^2 \theta_0} \left[3(1 - \varepsilon)^2 \cos^2 \theta_0 - 1 \right] \quad (2-7-1)$$

P は印加圧力， ε は収縮率， D_0 は初期の直径， θ_0 は初期の編み角度である。式によると高出力を得るためには高圧を印加することが必要であることが分かる。従来のマッキベン型人工筋肉は0.5MPa程度の空気により駆動することが多い。空気は圧縮性流体であることから，高圧での使用は爆発の危険性があり，実用的ではない。このことから，本プロジェクトでは，高出力を実現するために，油圧駆動を目指し，目標として，従来の空気圧駆動の10倍以上の5MPaで5kN以上の出力を得ることとした。

2-2-3) 開発した高出力人工筋肉

図2-7-20はプロトタイプ油圧駆動人工筋肉である。人工筋肉の最外径は15mm，ゴムチューブの外径は13.1mm，内径は9.5mmである。マッキベン型人工筋肉の耐圧性は最外層の繊維の強度に依存する。本検討では油圧での高圧駆動を実現することを目指し，高強度繊維を適応した。



図2-7-20 作製した人工筋肉のプロトタイプ（直径15mm 長さ280mm）

2-2-4) 油圧駆動人工筋肉の収縮力と収縮率

アクチュエータとしての収縮力と収縮率の特性は、ロードセルとレーザー測長機により測定した。1, 3, 5, 7MPaの圧力を印加した際の収縮力、収縮率の特性を表2-7-2と図2-7-21に示す。図2-7-21にはSchulteの式により求めた計算値もプロットした。ゴムと繊維の摩擦に起因すると推察される計算値と実測値のずれはあるが、顕著ではない。また、表2-7-2に示す通り、当初の目標である5kNの力の発現を5MPa印加することにより達成することができた。

表2-7-2 油圧駆動人工筋肉の最大収縮力・最大収縮率

印加圧力	1MPa	3MPa	5MPa	7MPa
最大収縮力 (kN)	1.9	5.2	8.8	12.0
最大収縮率 (%)	23	28	30	31

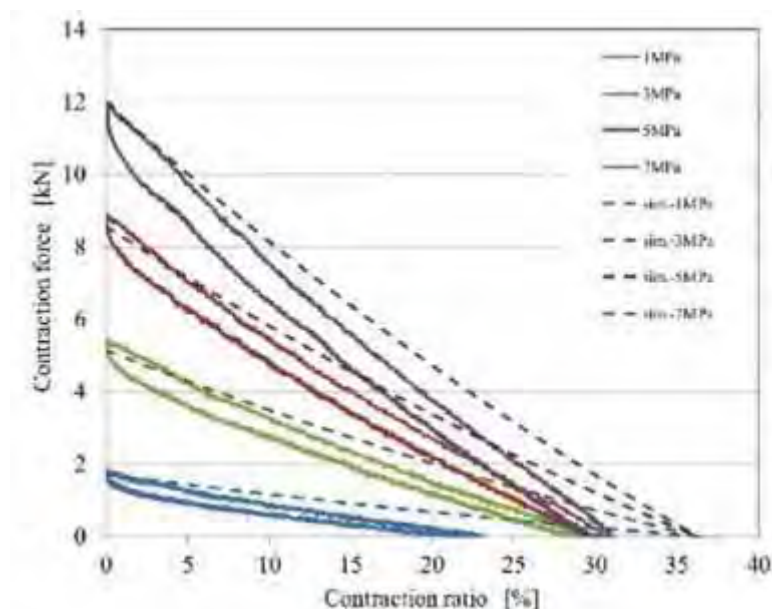


図2-7-21 油圧人工筋肉の収縮率・収縮力特性

代表的なアクチュエータであるモータ、シリンダと異なる点として、マッキベン型人工筋肉は収縮力が収縮率に依存するという特性を持つ（図2-7-21）。このことから、開発した人工筋肉をエネルギー効率という視点で従来のアクチュエータと比較する目的で、EDMの指標を用いた。EDMの指標は収縮力の収縮率による変化を加味した指標であり、マッキベン型人工筋肉の EDM_{AM} は下記の式で表現することができる。

$$EDM_{AM} = \frac{1}{M} \int F dx \quad (2-7-2)$$

$$= \frac{\pi D_0^2 L_0 P}{4M} \frac{1}{\sin^2 \theta_0} \left[\cos^2 \theta - (1 - \varepsilon_M)^3 \cos^2 \theta_0 - \varepsilon_M \right] \quad (2-7-3)$$

L_0 は初期長さ、 M は重量、 ε_M は最大収縮力である。また、シリンダタイプのアクチュエータの EDM_d は式(4)で得られる。

$$EDM_c = \frac{fs}{m} \quad (2-7-4)$$

f は発生力、 s はストローク、 m は質量である。表2-7-3は開発したマッキベン型人工筋とシリンダの EDM を比較した結果である。ここではシリンダの比較例として、PH-1ST15x168-T（JPN製）を用いた。

表2-7-3 油圧シリンダと油圧駆動人工筋肉の EDM の比較

油圧シリンダ	油圧人工筋肉
126.3	825.4

印加圧力は、シリンダは21MPa、開発した油圧人工筋肉は5MPa、長さはそれぞれ280mmである。表2-7-3で示されるように、開発した油圧人工筋肉は油圧シリンダよりもエネルギー効率が良いことが分かる。

続いて、開発した油圧人工筋肉ならではの特性を活かしたタフロボットへの応用の可能性について事例を示す。

2-2-5) 高い耐外部衝撃・振動特性を活かした応用例

開発したマッキベン型油圧人工筋は柔軟性を持つゴムチューブと高分子繊維から構成されるため、高い耐衝撃性、耐振動性が期待できる。この特性は災害現場で活躍するタフロボット実現のために重要な要素技術の一つと言える。図2-7-22に高い耐外部衝撃・振動性を確認するための実験を示す。本実験では、開発したマッキベン型油圧人工筋肉を拮抗させることでドリルを保持するアームを構成し、アームの先端にドリルを配置することにより、コンクリートの研り実験を行った実験であり、人工筋肉ならではの高い耐衝撃性・耐振動性を確認することができた。

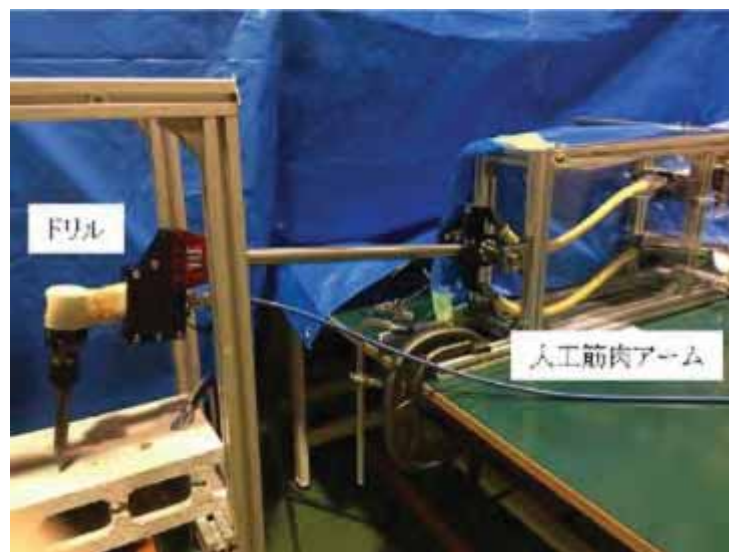


図2-7-22 耐衝撃性・耐振動性試験（油圧人工筋肉：長さ500mm 直径13.1mm）

2-2-6) タフロボットへの実装を想定した3自由度腕モデル

油圧人工筋肉は軽量高出力であると同時に柔軟性というこれまでのアクチュエータにない特徴を持つ。この柔軟性を活かし、3自由度の腕のモデルを作製した。

図2-7-23は3自由度腕の3D CADモデルである。本検討では4本の人工筋肉とユニバーサルジョイントを用い、人工筋肉ならではの滑らかな動きを目指した。

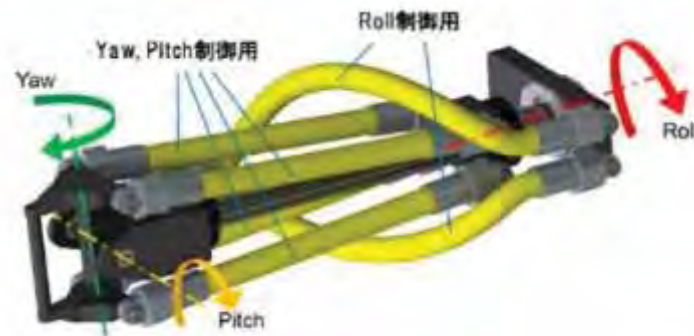


図2-7-23 3自由度腕モデル 3D CAD

Yaw, Pitch方向の動きは4本の人工筋肉により、腕のひねりに相当するロール方向の動きは2本の人工筋肉により駆動する。

今回開発した腕モデルの動きを図2-7-24に示す。柔軟性を持つ人工筋肉ならではの滑らかな動きを確認することができた。今回は0.5MPaの空気圧を印加し、動きを確認した。

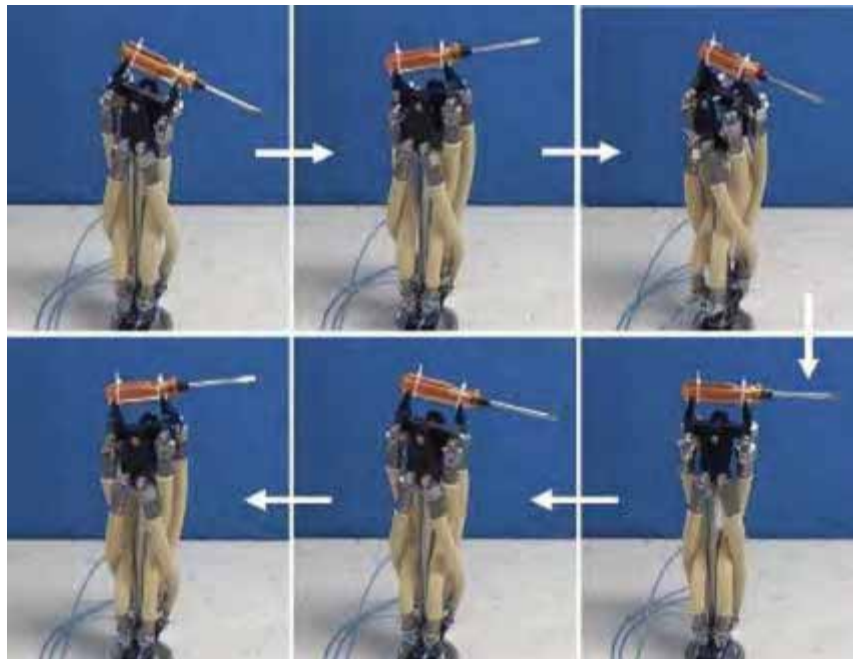


図2-7-24 マッキベン型人工筋肉による3自由度腕モデル (0.5MPa空気圧駆動)

2-2-7) 結論

タフ・ロボティクス・チャレンジ、高出力人工筋では、5MPaというマッキベン型人工筋肉では今までにない高圧レベルでの駆動を実現することにより、高出力を発生することが可能な油圧駆動人工筋肉を開発した。今回、構成材料および構造の開発に取り組み、耐高圧、耐油を実現することにより、高出力で軽量、エネルギー効率が高いアクチュエータを得ることができた。

また、開発したアクチュエータはゴムと高分子繊維からなり、高い耐衝撃性、耐振動性を持つことから、災害現場で活躍することが可能なタフロボット実現への貢献が期待できる。

今後はタフロボット実現に向けた検討、安心安全を実現するためのロボット分野を代表とする、一

般産業用途への展開を目指し取り組んでいきたい。

2-3) 微粒子励振バルブ

油圧・水圧・空圧による流体アクチュエータは高出力用途を中心に広く産業的に利用されており、近年ではそのバックドライバビリティなどに着目して油圧アクチュエータをロボットの動力源として利用することが期待されている[1, 2]。ロボットなどで必要とされる多自由度の機構では油圧制御機器の小型化が必要であるが、油圧アクチュエータの制御に必要な流量制御弁は比較的大型で重量が大きなものが多く、その小型化および軽量化が課題となっている。本研究では圧電振動子を駆動源とする微粒子励振型の小型バルブに着目し、この原理を油圧アクチュエータの制御弁に適用した。さらにこの原理を用いてアクチュエータの制御に適した三方弁を構成し、圧電振動子による振動状態の制御によりアクチュエータへの流体の供給・排出を切り替える小型三方弁を製作した。

この制御弁では、微小球もしくは粒子の励振による流量の制御が用いられている[3-15]。制御弁は、いくつかのオリフィス孔があけられ圧電振動子と一体となったオリフィス板と微粒子からなり、図 2-7-25 に示すように、微粒子が圧電振動子によって励振されたオリフィス板によって運動する。この際、振動の大きさによってオリフィス孔から離れる微粒子の数が増減し、開口するオリフィス孔の数により流量が変化する[5]。したがって、圧電振動子に印加する電圧の大きさにより流量を制御することが可能であり、流量制御弁として機能する。この原理を用いた空圧流量制御弁が提案されている[5-9]。

図 2-7-26 は、圧電振動子による励振を用いた微粒子励振型二方弁の試作例である。この二方弁は直径が 10 mm、長さが 9 mm と小さく、また 4.6 g と非常に軽量である。オリフィス孔の直径は 0.4 mm であり、微粒子として直径 0.7 mm のステンレスボールが使用されている。

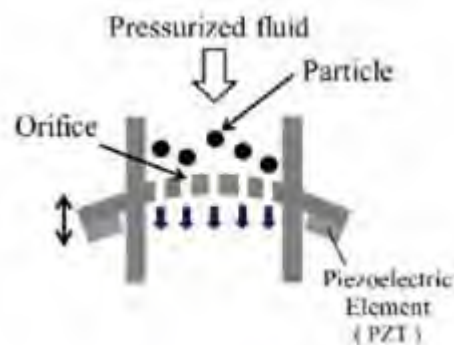


図 2-7-25 圧電振動子による励振を用いた微粒子励振型制御弁の駆動原理

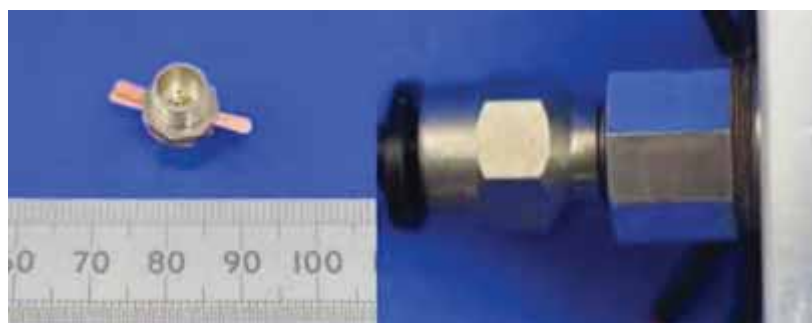


図 2-7-26 圧電振動子による励振を用いた微粒子励振型二方弁の試作例

共振駆動の圧電振動子はハイパワー用途に広く利用されている。圧電振動子により高出力の励振が可能であることから、この方式のバルブは油圧制御弁として用いることが可能であると考えられる。図 2-7-27 に水を用いた際の制御弁の流量と圧電振動子への印加電圧の大きさの関係を示す。低電圧領域で不感帯が見られるものの、流量は印加電圧の値によって制御可能であることが分かる。この制御弁を使用して、シリンダの速度制御にも成功している[11, 12]。

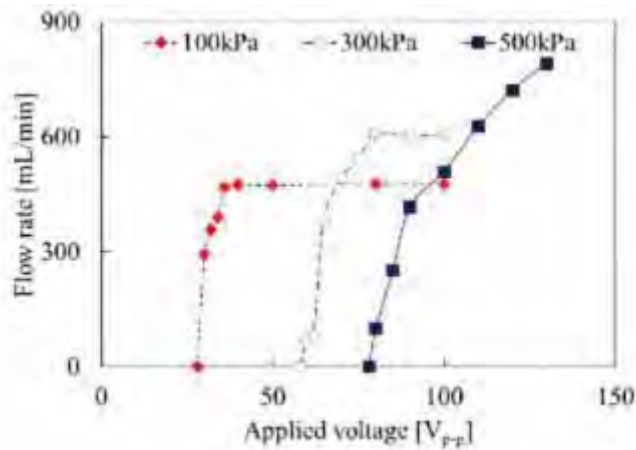


図 2-7-27 水を作動流体として用いた際の三方弁の流量と圧電振動子への印加電圧の関係

人工筋などの流体アクチュエータを駆動するためには、作動流体の供給と排出を制御する必要がある。供給側、排出側、そしてアクチュエータへ接続する 3 つのポートを持つ三方弁が使用される。微粒子励振型制御弁の原理を用いた三方弁について、設計・試作を行った。試作した三方弁は非常に小型であり、人工筋アクチュエータとも容易に一体化することが可能である。この三方弁では供給ポート、排出ポートにそれぞれ設置された圧電振動子により、作動流体の供給・排出を切り替えることができる構造となっている。

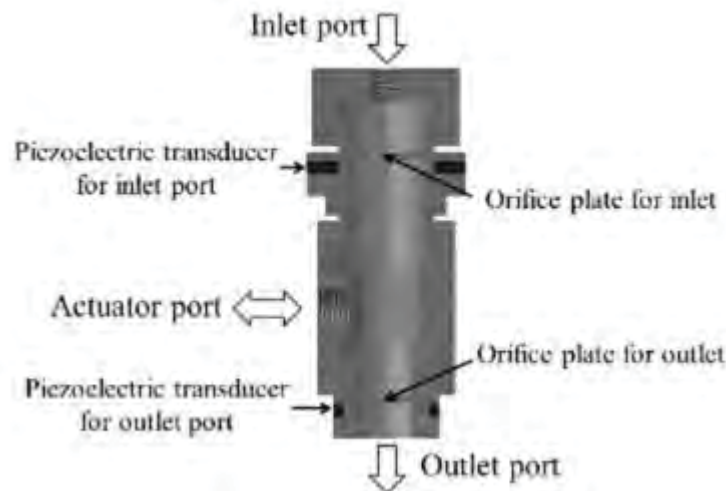


図 2-7-28 圧電振動子により励振される 2 つのオリフィス板を用いた三方弁の断面

試作した三方弁の断面を図 2-7-28 に示す。供給ポート、排出ポートではそれぞれ独立に圧電振動子によってオリフィス板が励振される。2 つのオリフィス板は異なる大きさであることから、固有振動数は異なっている。

図 2-7-29 に振動子構造の概要を示す。振動子はボルト締め型の圧電振動子の構造を基本として設計されている。環状に切り出された PZT 製の圧電材料板が銅製の電極を挟んで積層されている。圧電材料板と電極板はボルト締めされており、これによって圧電材料に対して予圧が印加され、高出力が得られるようになっている。オリフィス板は圧電振動子の固有モードで励振される。この固有モードの周波数は有限要素法を用いることによって求められている。それぞれ供給側および排出側のポートを構成する 2 つの振動子は作動流体の配管に接続されている。振動子は図 2-7-29 の有限要素法による解析結果に示されているように、配管への接続によって振動の減衰を生じないように設計されている。

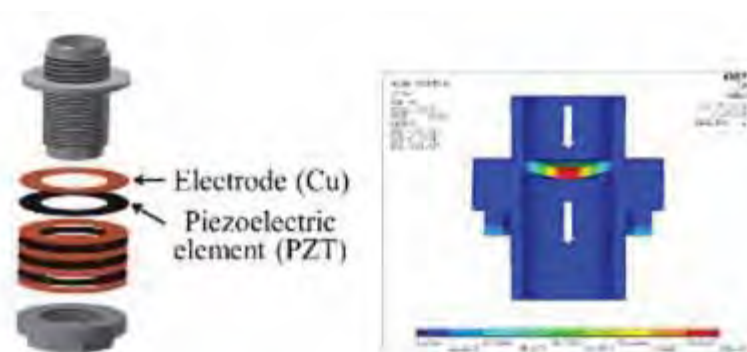


図 2-7-29 圧電振動子の構造と有限要素法による振動モード解析の結果



図 2-7-30 有限要素法による振動モード解析の結果

三方弁の設計を行うために、有限要素法を用いて振動モードに関する計算を行った。図 2-7-30 にモード解析の結果を示す。オリフィス板はそれぞれの固有振動数において励振された際に屈曲方向の大きな変形を得ていることが分かる。供給側のオリフィス板は 121.7 kHz で、排出側は 168.2 kHz で開口する結果が得られた。

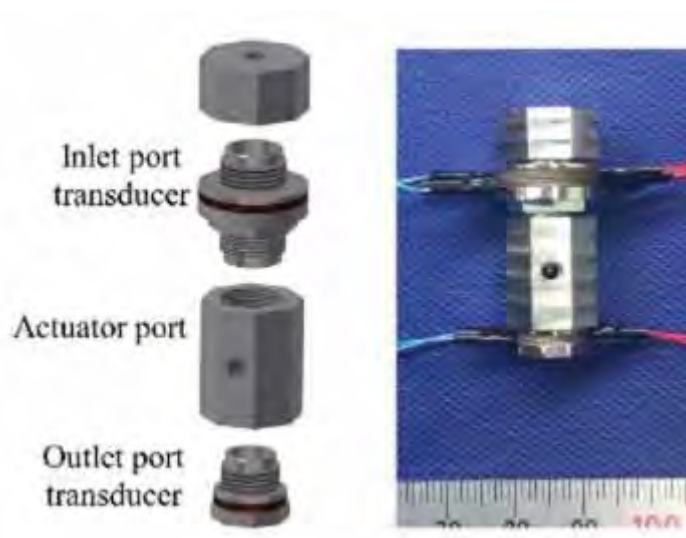


図 2-7-31 三方弁の構造と試作した三方弁の写真

三方弁全体の構造と試作した三方弁の写真を図 2-7-31 に示す。三方弁は長さ 35.0 mm、最大径 15.0 mm であり、質量は 26.5 g である。各オリフィス板には直径 0.4 mm の孔が中心から 0.2mm 間隔で 9 個あけられている。

試作した三方弁の振動子としての特性を測定した。図 2-7-32 にオリフィス板中心での振動速度と圧電振動子への印加電圧の周波数の関係を示す。振動速度はレーザドップラ振動計を用いて測定している。この測定結果は、各ポートのオリフィス板が異なる固有振動数を有していることを示している。

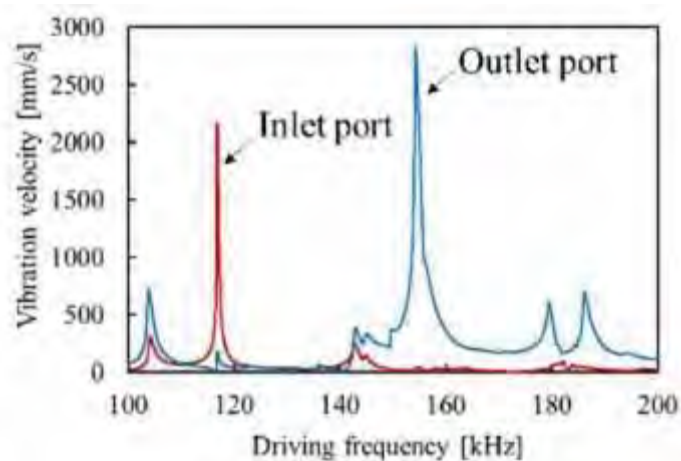


図 2-7-32 三方弁のオリフィス板の振動速度と圧電振動子の駆動周波数の関係

試作した三方弁の各ポートでの流量の値と、対応した圧電振動子への印加電圧の値の関係を図 2-7-33 に示す．供給圧は 0.1MPa である．作動流体はそれぞれのポートで対応する圧電振動子への印加電圧の値により制御されていることが分かる．

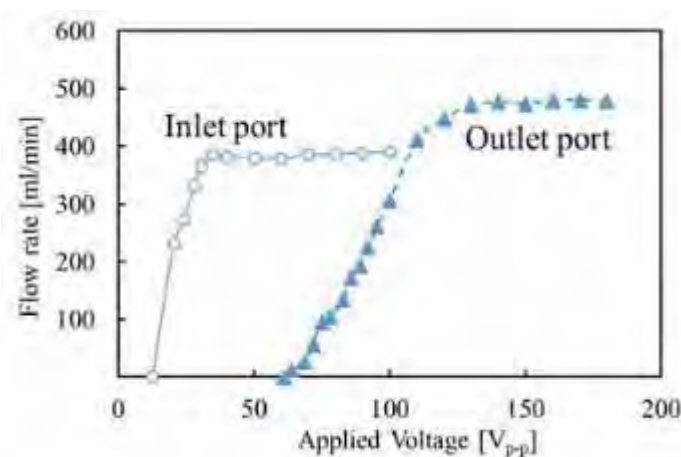


図 2-7-33 供給圧が 0.1 MPa の状態での試作した三方弁の各ポートでの流量の値と対応した圧電振動子への印加電圧の値の関係

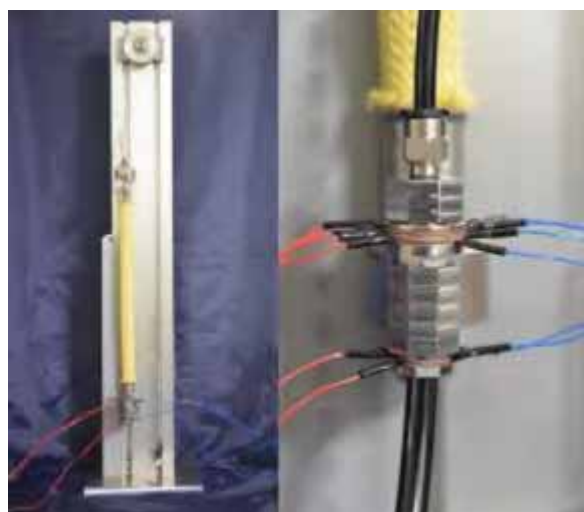


図 2-7-34 人工筋の端末へ三方弁を接続した状態

この三方弁は流体アクチュエータの制御に用いることを目的として試作したものである。すでに、試作した三方弁をシリンダおよび人工筋アクチュエータの作動流体の流量制御に使用可能であることを実験により示している。図 2-7-34 に、三方弁をマッキベン型人工筋アクチュエータの端末部へ接続した様子を示す。三方弁を用いることによってアクチュエータの伸縮速度を制御することに成功している。この三方弁は小型かつ軽量であることから、ロボット用人工筋アクチュエータユニットを構成するのに適している。

Reference

- [1] Raibert M, Blankespoor K, Nelson F, et al.: Bigdog the rough-terrain quadruped robot. Proceedings of 17th IFAC World Congress, 41, 10822-10825 (2008)
- [2] Semini C, Tsagarakis NG, Guglielmino E, et al.: Design of HyQ - a hydraulically and electrically actuated quadruped robot. Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 225, 831-849 (2011)
- [3] Sangiah DK, Plummer AR, Bowen CR, et al.: A novel piezohydraulic aerospace servovalve. Part I: design and modelling. Journal of System Control Engineering, 227, 371-389 (2013)
- [4] Branson DT, Johnston DN, Tilley DG, et al.: Piezoelectric actuation in a high bandwidth valve. Journal of Ferroelectrics. 408, 32-40 (2010)
- [5] Hirooka D, Suzumori K, Kanda T: Flow control valve for pneumatic actuators using particle excitation by PZT vibrator. Sensors and Actuators A: Physical. 155, 285-289 (2009)
- [6] Hirooka D, Suzumori K, Kanda T.: Design and evaluation of orifice arrangement for particle-excitation flow control valve. Sensor and Actuators A: Physical. 171, 283-291 (2011)
- [7] Hirooka D, Yamaguchi T, Furushiro N, et al.: Research on controllability of the particle excitation flow control valve. Proceedings of 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology. 136-137 (2015)
- [8] Hirooka D, Yamaguchi T, Furushiro N, et al.: Highly responsive and stable flow control valve using a PZT transducer. Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium. 6H-6 (2016)
- [9] Hirooka D, Yamaguchi T, Furushiro N, et al.: Particle-excitation flow-control valve using piezo vibration-improvement for a high flow rate and research on controllability. IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines. 137, 32-37 (2017)
- [10] Tatsumi M, Izusawa K, Hirai S.: Miniaturized unconstrained valves with pressure control for driving a robot finger. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. 1528-1533 (2011)
- [11] Ukida T, Suzumori K, Nabae H, et al.: A small water flow control valve using particle excitation by PZT vibrator. Proc 6th ICAM. 221-222 (2015)
- [12] Ukida T, Suzumori K, Nabae H, Kanda T, Ofuji S.: Hydraulic control by flow control valve using particle excitation. JFPS International Journal of Fluid Power System. 10, 38-46 (2017)
- [13] Ukida T, Suzumori K, Nabae H, Kanda T: Analysis of flow control valve in hydraulic system using particle excitation. Proceeding of The 10th JFPS International Symposium on Fluid Power. 2C12 (2017)
- [14] Osaki H, Kanda T, Ofuji S, Seno N, Suzumori K, Ukida T, Nabae H: A small three-way valve using particle excitation with piezoelectric for hydraulic actuators. Advanced Robotics. 32, 500-510 (2018)
- [15] Kanda T, Osaki H, Seno N, Wakimoto S, Ukida T, Suzumori K, Nabae H: A small three-way hydraulic valve using particle excitation controlled by one piezoelectric transducer. Proceedings of 16th International Conference on New Actuators. 442-445 (2018)

2-4) ハイブリッドブースター

本研究においては、サーボ弁駆動に頼らないタフな油圧制御システムの実現を目指し、電動と油圧を効果的に組み合わせた新しい油圧回路である「油圧ハイブリッドサーボブースター」をロボットに適用するための技術開発を行った。以下、この新油圧回路の原理について述べ、本プロジェクトの中で行った単軸スライダと3軸ロボットマニピュレータに適用した成果をまとめ、最後に今後の展望について述べる。

2-4-1) 油圧回路

油圧ハイブリッドサーボブースター (Hydraulic Hybrid Servo Booster; H2SB) の油圧回路は図 2-7-35 に示すものである。これは基本油圧回路として広く知られている増圧回路と閉回路を、両方の良い特徴だけを組み合わせることで高速・高精度サーボ用回路として進化させたものである。4つのバルブ (V1~V4) からなる開回路 (バルブブリッジとも呼ぶ) にサーボモータ駆動の両回転ポンプ (サーボポンプ) を挿入した複合回路で、この回路構成が基本特許となっている [1]。矢印が液体の流れを示しており、4つのバルブを使って流量を On/Off または連続調整することによって従来の開回路 (メータインまたはメータアウト) として動作する (図 2-7-35 左)。また、V3 と V4 で流れをせき止めてサーボポンプを駆動すれば閉回路モードとしても動作する (図 2-7-35 中央)。これはいわゆる EHA (Electro Hydrostatic Actuator) としての使い方である。サーボポンプが小型であればあるほど、高い負荷をかけながら精密に位置決めと加圧制御が可能である。逆に、速度は低くなってしまう。最後に、本回路の負荷価値とも言える機能がブースト (増圧) モードである (図 2-7-35 右)。メインポンプから吐出された液体はサーボポンプでさらに圧縮され、高い圧力でシリンダピストンを押すことができる。

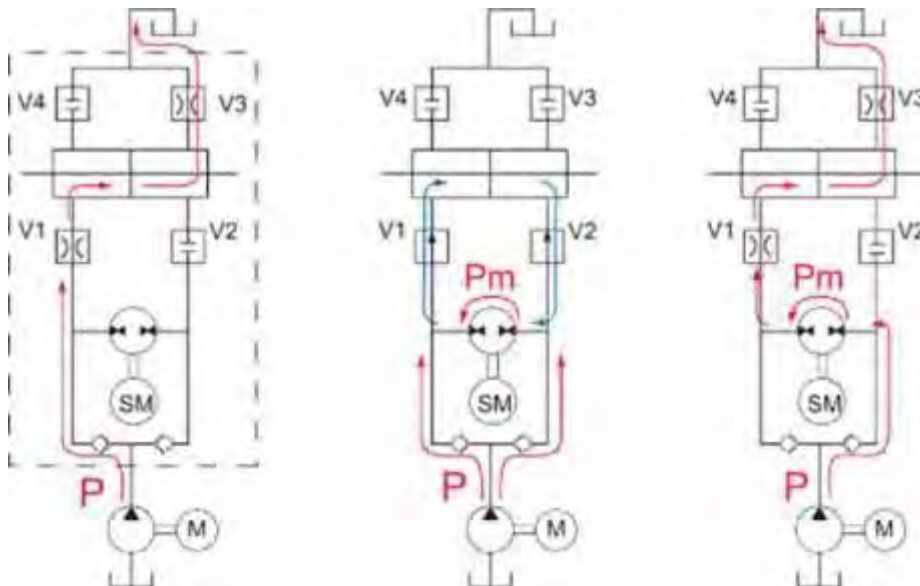


図 2-7-35 H2SB の基本回路図 (左：開回路，中：閉回路，右：ブースト)；破線で囲まれた回路を並列接続することで多軸駆動に対応

本回路は電動では大きいトルクを出そうとするとギヤが巨大になってしまうが、油圧では逆にポンプが小さくなるという原理的な違いを利用している。これによって、本技術は従来の EHA の欠点を部分的に克服している。低圧大流量のメインポンプ 1 つに対して、複数の小型サーボポンプ (「サブポンプ」と呼んでも誤解はないと思うが、ここではサーボ用途に限定するため、以下、サーボポンプと呼ぶ) を組み合わせて適用できるので、多軸ロボットの駆動に特に好適である。V1 から V4 で用いるバルブの種類によって無数の実施例が考えられるため、適用先に応じて柔軟に回路を設計することができる。

設計例として、最高圧力が同じサーボポンプとメインポンプとで回路を構成した場合を考える。このとき、EHA が出せる速度範囲内では EHA の 2 倍の力、無負荷時にはメインポンプが出せる最高速度、そして位置決め精度は EHA と同じシステムが得られる。遠隔配置した 1 つのメインポンプを最大

パワーの半分で使うことはコスト的に大きなロスにならないが、アクチュエータに近接配置する多くの EHA を半分のパワーで使い続けるのはコストとスペースの無駄である。

また、複数のアクチュエータを運用する際に、運動のタイミングをずらしたり、アキュムレータを活用して総流量を平滑すればメインポンプを小型化可能である。必要な発揮力が EHA でも出せる範囲で十分な場合、設計段階でシリンダ径を細くして速度をアップしつつコンパクト化が図れる（シリンダのスケーリングはサーボポンプのそれよりも容易であるから）。

2-4-2) 本研究がめざすタフ油圧ロボット

本研究が ImPACT において目指すロボットの特徴は（ア）耐環境、（イ）軽量コンパクト、（ウ）高速、（エ）精密、（オ）静粛、（カ）低発熱、（キ）低コストである[2]。各項目の根拠を以下にまとめた：

- （ア） 耐環境密封構造が容易に作れる
- （イ） 軽量コンパクト：シリンダと油圧モータに根元から配管するだけなので機械本体は軽量
- （ウ） 高速：低圧大流量ポンプと汎用バルブで容易に速度が出せる
- （エ） 精密：小容量ポンプで低速域においては微小に流量を送り出せる
- （オ） 静粛：内接式ギアポンプの構造、低圧メインポンプによる
- （カ） 低発熱：サーボ弁を用いないため、高圧油のリークによるエネルギーロスが少ない
- （キ） 低コスト：大量生産品だけで構成できる

本技術が実現するロボットは通常はメインポンプの流量範囲内でアクチュエータが高速に動くことに加え、小型サーボポンプが出せる流量範囲内では超精密・高負荷制御ができるという特徴を持つ。したがって、従来のロボットのように、全速度域で高負荷精密制御するのではなく、低速域での超精密制御を重視する。そして高速域では精密さを放棄する代わりに超高速を狙う。この考え方の転換が大量生産品の利用を可能とし、コストを劇的に削減できる可能性がある。

2-4-3) 単軸スライダへの適用

新しい油圧回路をロボットに適用するための準備として、建機で多用される標準的な片ロッドシリンダの位置制御、力制御をテストした。ここで小型のサーボポンプを新規開発し、サーボユニットを設計製作した（バージョン1）。各ポートの圧力やサーボモータの状態監視のために複数のセンサが必要であり、かつ4つのバルブとサーボモータの制御が必要であることから、多入力多出力の高度な制御アルゴリズムに適応する小型デジタルコントローラを開発した[4][5]。

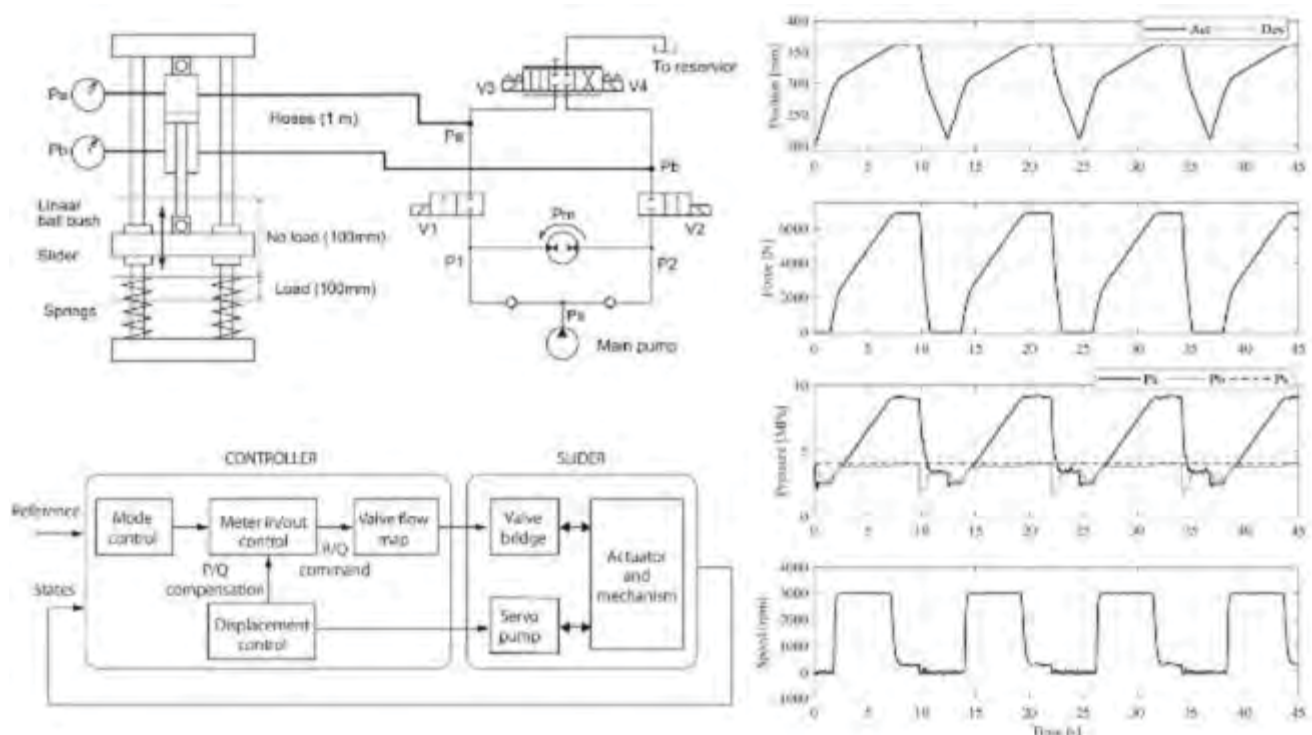


図 2-7-36 (左上) 1 軸スライダーテストベンチと油圧回路；(左下) 制御アルゴリズム；(右) 繰り返し位置決め実験

制御アルゴリズムはサーボポンプの制御とバルブの制御から構成されている。高応答なサーボポンプでは単純な PID 制御を利用し、バルブブリッジをモードに応じて操作する方式となっている。バルブ制御においては逆フローマップを同定し、必要な圧力と流量から適切なバルブ開度を計算している。これにより、フィードフォワードとフィードバックを併用した 2 自由度制御系が構成される。下で述べるロボットマニピュレータにおいても同じアルゴリズムを利用している。

試作したシステムを用いて、バネ負荷に対する連続的な位置決め実験を行った。図 2-7-36 右にその結果を示す。これは開回路モードとブーストモードの連携例を示している。メインポンプ圧を 4MPa にセットし、開回路モードで最速でスライドを下降させる (V2 と V4 は閉じる)。目標位置は 365 mm で、バネは 85 mm 圧縮される。絶対位置誤差 0.1mm を 1 秒間保持したのち、また最速で上昇させる。

本実験におけるブーストモードは位置を監視し、290 mm から開始している。これはバネ負荷をうけるよりはるかに手前である。H2SB は小型サーボポンプを利用するため、その吐出量はシリンダ容積に比較して極めて少ないため、サーボモータを最速で回転させてもスピードは追いつかない (モータは空転)。しかし、バネ負荷によってスライダのスピードが徐々に落ちるにしたがって流量が追いつき、そこからブースト作用が始まる。このような自然なブースト効果は正の負荷がある場合には利用できるが、下で述べる多軸ロボットの場合、負荷方向は頻繁に変化するため、センサで各状態を監視しつつ適切にモードを切り替えている。

この実験では繰り返し位置決め誤差は 0.02mm であり、このとき、圧力は 4 MPa から 8 MPa に上昇している。応答性などの制御性能はサーボモータの性能に依存するが、小型サーボモータは多少オーバースペックでも全体の価格にはほとんど影響しない。なお、このスライダを大型化した 4 柱型のスライダー (10 トンサーボプレス) においてもスライドの高速駆動と精密位置決め、ブーストによる精密加圧制御に成功した [7]。

2-4-4) 油圧マニピュレータへの適用

新しい油圧回路 H2SB の「多軸」サーボへの有効性を示すため、簡単なマニピュレータを構築して各種試験を行っている [3][5][6]。回路の原理によれば、本ロボットは従来のロボットのように、全速度域で高負荷精密制御を実現するのではなく、高速域と低速域とで動作を区分し、低速域で高負荷精密制御を達成する。それ以外のところでは精密さを要求せず、回路が許容する限り高速に動かすことを狙う。

試作したロボットの外観を図 2-7-37 に示す。これは鉛直平面内で動作する 3 軸マニピュレータである。油圧回路は図 2-7-37 に示すとおり、共通の供給・戻りラインの間に各 H2SB ユニートを並列に配置しただけの構成である。

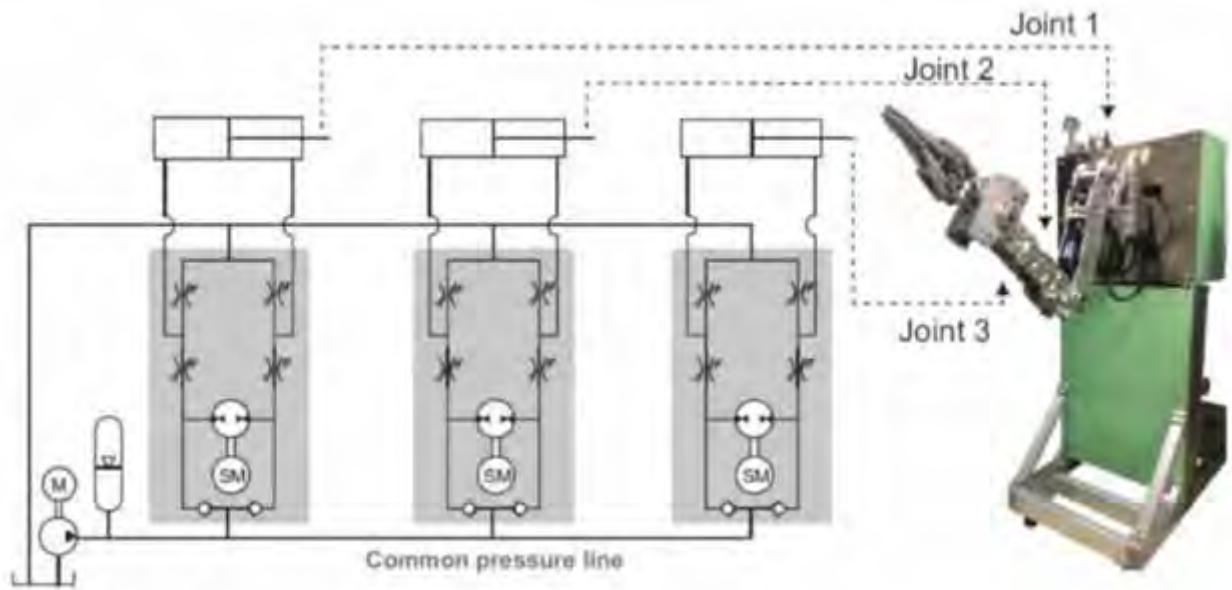
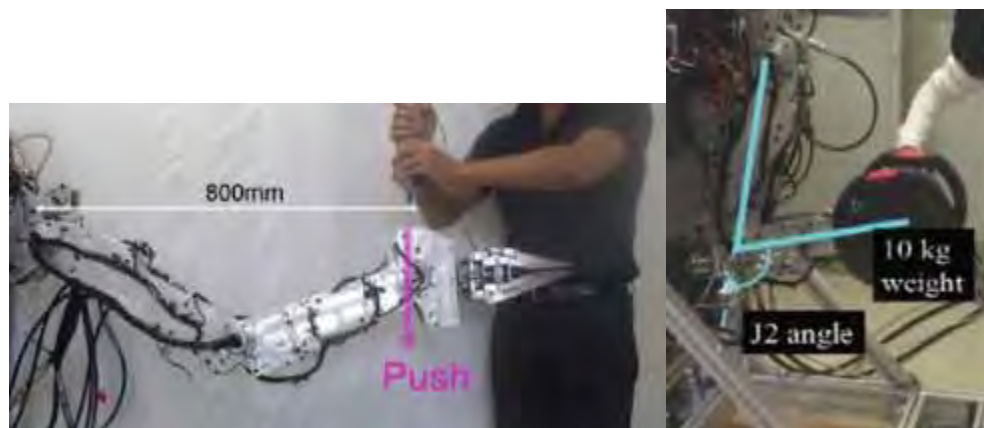


図 2-7-37 3 軸ロボットと油圧回路図

研究期間中にマニピュレータと位置制御とトルク制御が実現された。図 2-7-38 の左は EHA モードにおける簡単な位置軌道追従実験の様子を示す。ここでは、ロボットが動作中にオペレータが外乱を加えている。ロボットはバックドライバビリティを有するため、外乱に対して柔軟に適用している様子がわかる。また、同図右はロボットの関節トルク制御性能を示唆する重力補償実験を示す。ここでは EHA モードだけでは力が足りないため、ブーストモードを利用している。重力補償下でロボットは外力や衝撃に対してしなやかに追従することが証明された。定量的な応答性については目下調査中である[8]。



(左) EHA モードにおける位置軌道追従実験

(右) 重力保証実験

図 2-7-38 3 軸マニピュレータの実験の様子

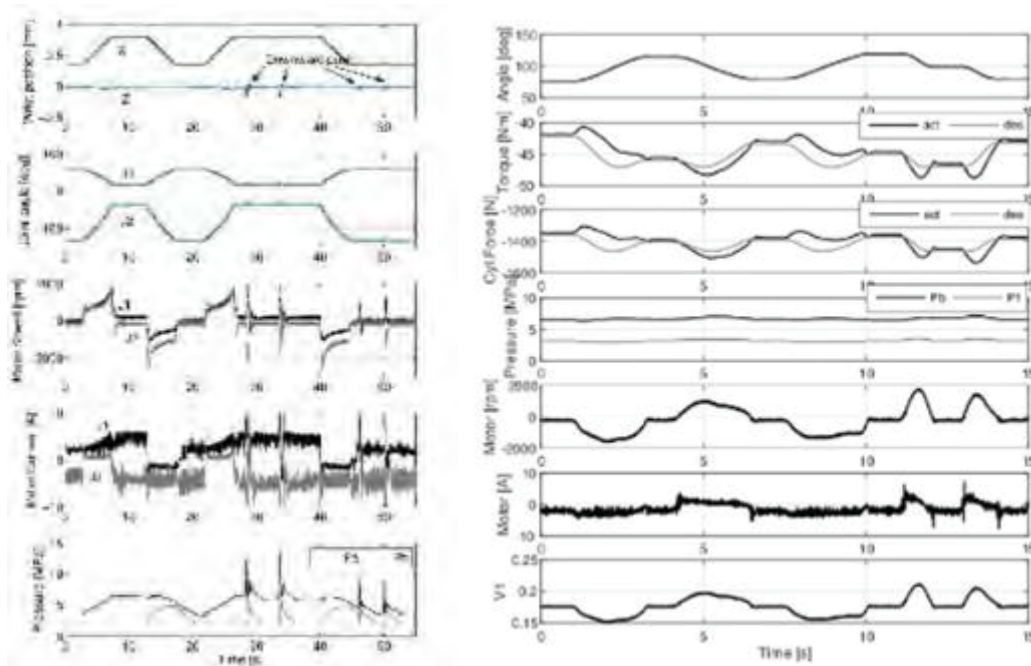


図 2-7-39 3 軸マニピュレータの実験結果

(左) EHA モードにおける位置制御と外乱応答；(右) ブーストモードにおけるトルク制御

参考文献

- 1) Hyon, S., Mizui, H. and Mori Y.: Hydraulic drive circuit, US Patent 9458864 (PCT/JP2013/069900) (2016).
- 2) 玄相昊: 油圧ハイブリッドサーボによる新しいロボットの提案, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会, AC3E2-01 (2016).
- 3) 谷本純一, 真下瑛一, 玄相昊: 油圧ハイブリッドマニピュレータの試作, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会, AC2U2-03 (2016).
- 4) 麻生翔太, 野村敏行, 玄相昊: 油圧ハイブリッドサーボコントローラと片ロードスライダへの適用, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会, AC1X2-08 (2016).
- 5) Hyon, S., Tanimoto, S. and Asao, S.: Toward compliant, fast, high-precision, and low-cost manipulator with Hydraulic Hybrid Servo Booster, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 39-44 (2017).
- 6) Hyon, S., Tanimoto, S.: Joint torque control of a hydraulic manipulator with hybrid servo booster, The 10th JFPS International Symposium on Fluid Power (2017).
- 7) Hyon, S., Li, W. and Mori, Y.: Realization of fast 10-ton servo press using hydraulic hybrid servo booster, The 10th JFPS International Symposium on Fluid Power (2017).
- 8) Hyon, S.: Overpressure compensation for Hydraulic Hybrid Servo Booster applied to hydraulic manipulator, IEEE International Conference on Robotics and Automation, (under review).

2-5) 建設ロボットへの応用

2-1) に記されている様に、「極限油圧コンポーネント開発」において、低フリクションアクチュエータ、小型ベーンタイプ揺動モータ、多ポートスィベルジョイント等を開発した。さらに進んで、これらのコンポーネントの実機適用をめざし、双腕建設ロボットのロアアーム先端に取り付けるエンドイフェクタとして油圧タフ多指ロボットハンド（タフハンド）の試作を行った。試作したタフハンドは、機能上の特徴として、砂利・土砂すくい等を行うバケットモードと、物体を把持するハンドモードの2つの動作モードを持つ。また、建機アームの先端に取り付けるので軽量化が大変重要になる。さらに、通常の建機のような荒っぽい使い方も想定し、そのためにハンド自体の制御は極力簡素

化するのが望ましいと考えた。以下に、これらの設計方針の下に試作されたタフハンドとその試験結果について記す。

2-5-1) 油圧タフ多指ハンドの構造

図 2-7-40～2-7-42 にタフハンドの外観および断面図を示す。指は 4 本で、外側の 2 本の指（回転指）と中央の 2 本の指（固定指）から成る。2 本の回転指がそれぞれ根元の軸を中心に反対方向に 157° 回転することで、ハンドモードとバケットモードの 2 つの動作モードを切り替える。この回転は、左右それぞれ 1 個ずつのベーンタイプ油圧揺動モータにより行う。

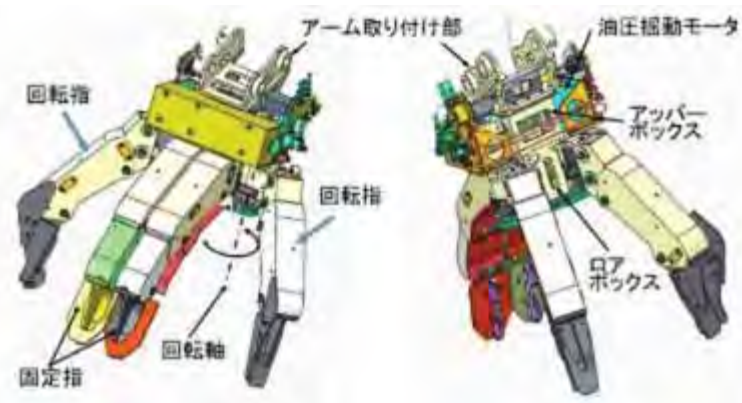


図 2-7-40 タフハンドの構造

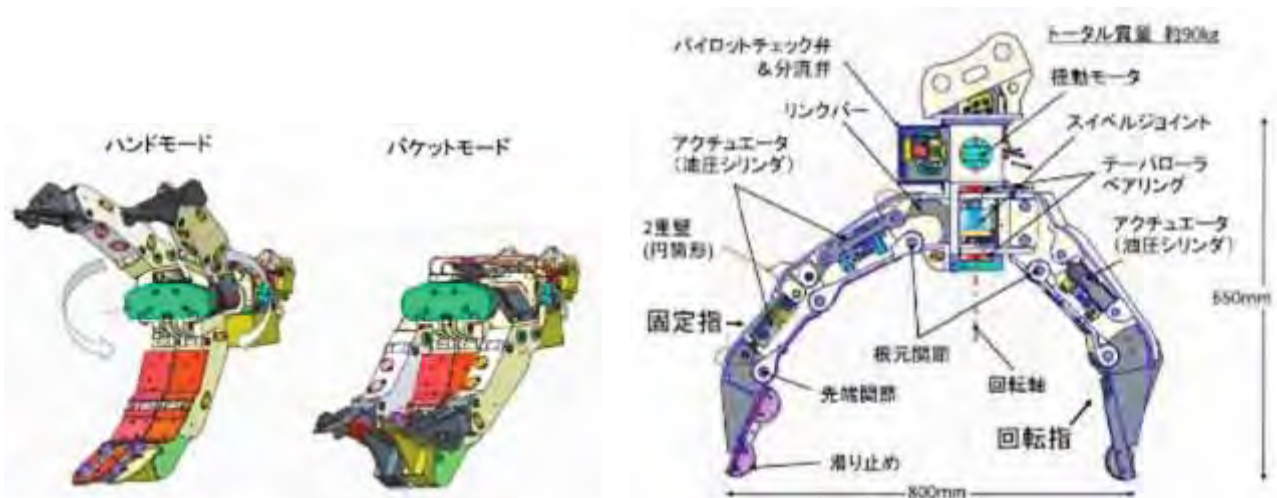


図 2-7-41 バケットモードとハンドモード

図 2-7-42 タフハンド断面図

回転指は 1 関節を持つ。固定指は 3 関節を持つが、第 1 関節（根元）と第 2 関節（中間）は指内部のリンクでつながっており連動して動くため、自由度は 2 である。指関節の回転は 1 自由度につき 1 個の直動アクチュエータ（油圧シリンダ、内径 $\phi 22$ 、ストローク 37mm）で行う。これらのアクチュエータはすべて同一仕様である。バケット形状になったとき中央にくぼみが出るよう回転指は固定指よりも短くなっている。

砂利すくい時に指が砂利の中を掻き分けながら動くことなどから、ハンド部には一切のセンサを装着せず、従って、電気配線は一切ない。また、土砂・砂利が指内部に侵入しないよう、可動部が動いても指内部が外部に露出しない設計になっており、ハンドのアーム装着部を除いて、油圧配管・ホースはすべてハンド内部を通して行っている。ハンドは指関節等可動部が多く、しかも、ハンド内部、指内部のスペースは非常に限られるため、適宜特製の小型スィベルジョイントを用い、指内部に使用するホースはすべて口金 1/16' の細いものとした。

重量物把持には指と物体の接触部の摩擦が重要である。そのため指先端には滑り止めの歯が付いている。この歯は長時間の稼動で摩滅するので交換可能としている。ただし、把持対象物が軟弱な場

合、対象物を傷つける恐れがあり、特に建設作業に用いる場合を考えると、滑り止めにはさらに改善の余地があると思われる。

2-5-2) 油圧制御系

図 2-7-43 に油圧制御系を示す。油圧系は極力シンプルなものとした。その基本機能は、①4本の指の根元指関節開閉、②2本の固定指の先端関節開閉、③回転指の回転、④関節回転動作シリンダの油圧調整（握力調整）の4つであり、それぞれに小型サーボバルブ1個が当てられる。この他に、後に述べるようにパイロットチェックバルブ1個、1:1 分流弁1個が追加される。また、油圧制御用に油圧センサを1個用いる。ハンド制御用油圧回路のPポート、Tポートは建機ロボット本体に接続される。これで分かるように、4つの根元関節、2つの先端関節、2本の回転指回転はそれぞれ同時に行われ、各指独立して行うことは出来ない。

また、指毎の握力制御も出来ない。なお、油圧制御はセンサ出力の単純なPIDフィードバック制御である。油圧シリンダ最大圧は21MPaであり、指先先端での把持力は最大800Nである。

前述のように回転指より固定指のほうが長いため、物体把持時、回転指の把持力（物体との接触部の力）が固定指の把持力より大きくなり固定指が押し戻され、安定して把持出来ない可能性がある。これを避けるため固定指閉側回路にパイロットチェック弁を設けている。また、回転指と固定指では自重がかなり異なり内部構造も異なるので同時開閉しにくい。極力同時動作に近づけるため、閉側の固定指・回転指回路の分岐に流量1:1の分流弁を用いている。その他の回路分岐はすべて単純な分岐である。

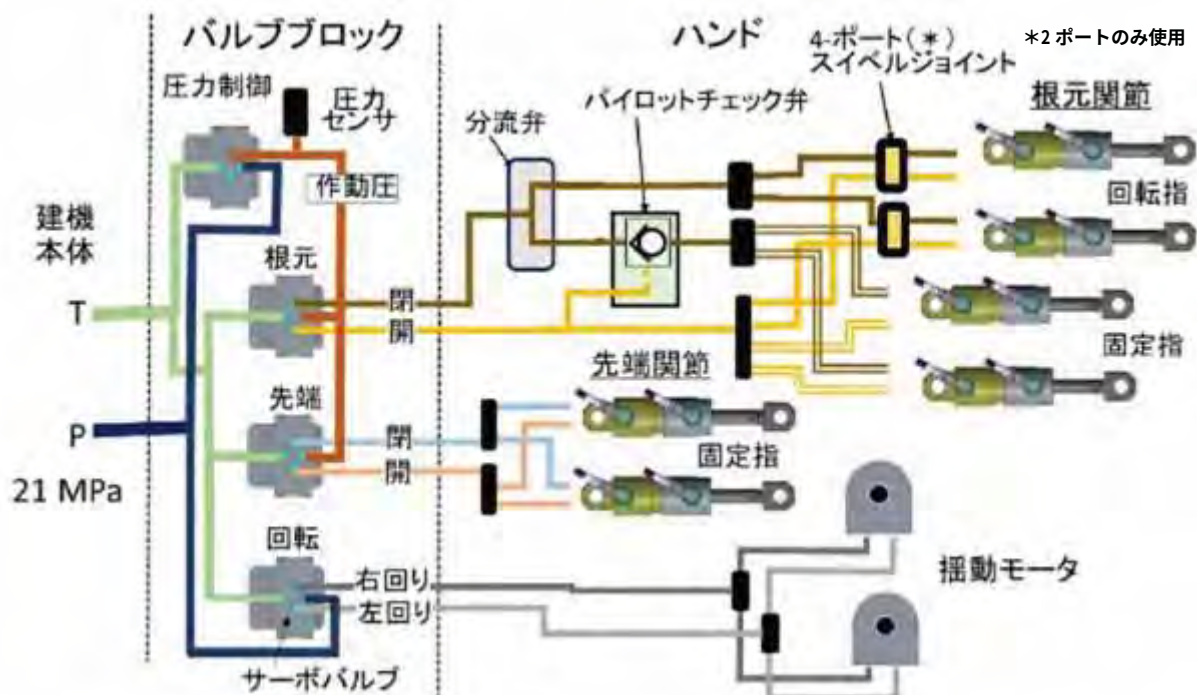


図 2-7-43 油圧制御回路

バケットモードではハンドをバケット形に固定するのみで、関節の開閉は行わない。形状固定は各アクチュエータのストロークエンド突き当て、または可動部のストッパ突き当てで行う。

4個のサーボバルブは油圧センサとともに同じバルブブロックに装着され、ハンドとは別に建機アーム上に装着される。なお、小型のサーボバルブを用いた理由は、建機本体からのハンド側への供給電流に制限があるためで、これらはすべて同型式の消費電流の少ないものを用いている。ただし、機能によりそれぞれメインスプールのオーバーラップを最適化してある。開閉動作のサーボバルブは中立位置すなわちアクチュエータへの回路をすべてcloseの状態に保つことが可能で、これにより各可動部を中間位置に停止する事が出来る。上述パイロットチェック弁と分流弁はハンドに直接装着されている。

2-5-3) 電子制御系

図 2-7-44 に本ハンドの制御系の概要を示す。複腕ロボットに取り付けたハンドの操作は、無線操縦コクピットからのモード切り替え、ハンドモードでの指開閉+握力調整（油圧指令値）等の指令を、ロボット本体のコントローラを経由してハンド制御ボックスが受け取り、これが直接 4 個の制御バルブを駆動してハンドを制御する。

本ハンドのコントロールボックスは、サーボバルブの専用ドライバを使用せず、本研究のハンド制御に特化した回路を新規設計製作した。その結果、コントロールボックスは非常に小型化（100×70×40）され、スペース上制約の多い 7 自由度ロアアームに装着可能となった(図 2-7-48)。

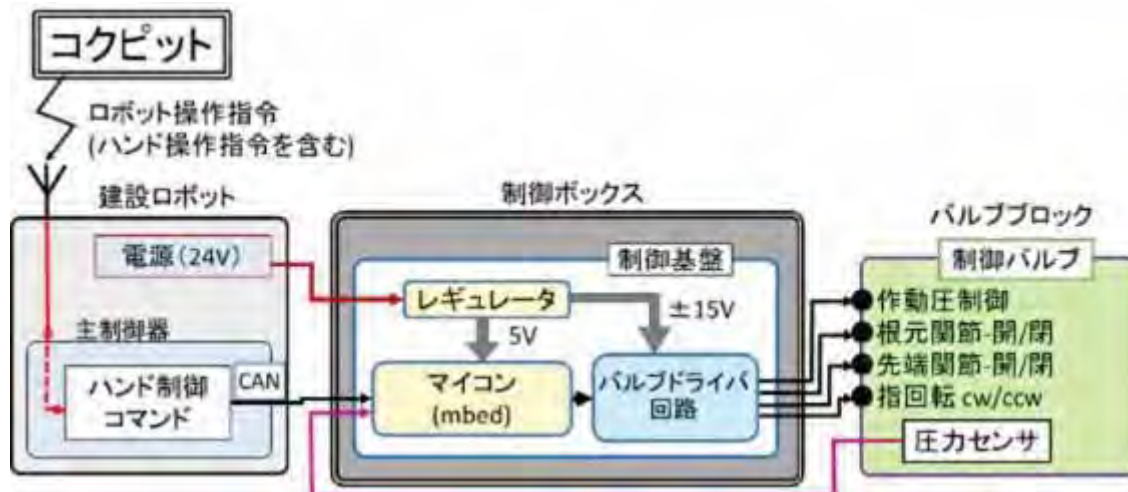


図 2-7-44 制御系概要

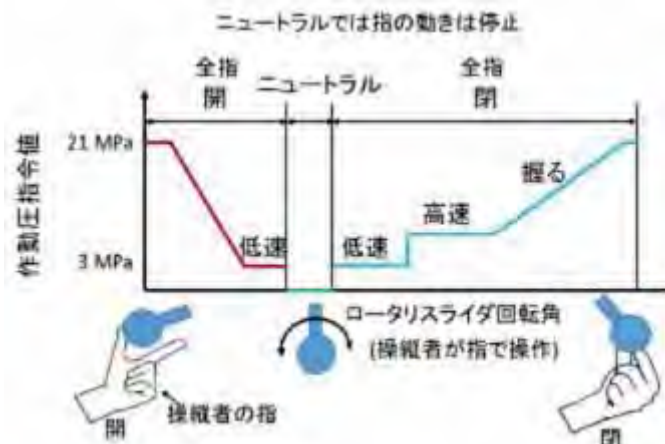


図 2-7-45 ハンド開閉と握力制御

ハンドの開閉と握力は、操縦者が握って操作する回転型スライダによって図 2-7-45 のように制御される。すなわち、スライダには中立の位置があり、レバーがこの位置にあるときハンド指開閉バルブは中立でハンド指は動かず、アクチュエータ油圧は最低レベルに保持される。操作者がレバーを握る方向に動かすと指開閉バルブはハンド指が閉じる方向に回路を開く。このとき、握る量（ストローク）が大きいほどアクチュエータ油圧指令値が高くなりハンド握力が大きくなる。逆に、操作者がレバーを開く方向に動かすとバルブが開方向に開きハンド指が開く。ここでも開く量に応じてアクチュエータ油圧、すなわちハンド握力が変化する。開き、閉じどちらの場合も中立位置に近いところでは油圧が低く設定されハンド指の開閉をゆっくり行うことが出来る。レバーには指令油圧値に応じた力がフィードバックされて操作性を向上している。

2-5-4) 把持物と試験結果

試作したタフハンドを建設ロボットに装着し、(1)物体把持試験、(2)砂利すくい試験、(3)災害現場を模擬したテストフィールドでのタスク試験を行った。

まず、ハンドモードでの把持試験であるが、把持物は、様々な硬さ、大きさ・形状、重量のものを選んだ。試験に供した把持物と把持結果を表 2-7-4 に示す。結果の評価は、対象物を把持したまま 50cm～1m ほど持ち上げハンドを 90 度前側上方（ダンプ側）に回転させ、また元に戻し地面に下ろすまで安定して把持できている場合を良好とした。すべての対象物が良好に把持できている。図 2-7-46 にいくつかの対象物を把持している様子を示す。今回の試験でもっとも重いものはコンクリート製テトラポッドで質量は約 40kg である。設計上は 100kg 程度まで把持可能であるが、さまざまな制約上試験ではこれを上限とした。

次に、バケットモードでの砂利すくいの様子を図 2-7-47 に示す。①⇒②⇒③の順序で通常のバケットが装着されたときと同様の動作を行うことで砂利すくいが可能であることが分かる。

なお、図 2-7-48 にタフハンドを複腕建設ロボットに装着した様子を示す。

表 2-7-4 被把持物

被把持物	サイズ(mm)	質量(kg)	結果	備考
岩石	400x200x200	20	良好	非定型、重量物
コンクリートブロック	390x100x190	8	良好	一般的
テトラポッド	450x450x450	40	良好	非定型、重量物
ペール缶	φ 300xL360	2	良好	大径、縦置き
紙パイプ(太)	φ 300xL1260	4	良好	大径、長尺、横置き
紙パイプ(細)	φ 85xL1200	1	良好	小径、長尺、横置き
塩ビパイプ(長)	φ 220xL2000	13	良好	中径、長尺、横置き
塩ビパイプ(短)	φ 220xL230	1	良好	中径、縦置き
ゴムタイヤ	φ 580xH135	5	良好	大径、弾性体



図 2-7-46 タフハンドによる物体把持



図 2-7-47 タフハンドによる砂利すくい



図 2-7-48 複腕建設ロボットへのタフハンド装着

2-5-5) 災害現場を模したテストフィールドでのタスク実行

本ハンドを取り付けた複腕建設ロボットの実働状況を図 2-7-49 に示す。これは災害現場での倒壊家屋に砂利がかぶさっている状況を模したものである。タスクは、①まずショベルモードで屋根の上にある土砂を掻きおろし（左）、②その後続いて、ハンドモードで屋根を持ち上げ、その地面とのスキマにもう一方のアーム（アッパアーム）でジャッキを差し込み（右）、レスキュー隊員などが侵入できる経路を確保するというものである。大きな問題なくタスクを確実に実行することができた。また、アッパアームのピッチ駆動には、本研究で開発された 2 本の低摺動シリンダが用いられており、アームの繊細な動きの実現に役立っている。これらにより本タフハンドおよび本研究開発の実効性が確認できた。



図 2-7-49 テストフィールドでのタスク実行の様子
(福島RTF (Robot test field) におけるImPACTフィールド評価試験)

2-5-6) 終わりに

本研究開発を進めるに当たり多大なご協力をいただいた大阪大学 吉灘裕特任教授，株式会社小松製作所，JPN 株式会社，共栄産業株式会社の関係各位に深く感謝いたします

2-6) 油圧 WAREC への応用

2-6-1) 全体設計

前述の油圧モータ及び周辺コンポーネントをロボットプラットフォームの一つであるWAREC-1と互換性の高い油圧WAREC一肢を試作し開発したコンポーネントの適用性を検証した。WAREC-1と油圧脚ロボットの一肢の構成を図2-7-50に示す。WAREC-1各関節の動作角は最大214°または無限回転であり、

想定動作も幅広いことから置き換えには油圧アクチュエータの中でも回転型が適している．今回は，動作角 214° までの関節については構造が単純で軽量にしやすい揺動モータ，一回転以上が必要な関節には小型で無限回転が得られる斜板アキシャルピストンモータを用いる．さらに，WAREC-1のアクチュエータは必要な出力によって大中小の三種類が用いられている．油圧アクチュエータでも各種トルクの異なる二種類ずつを開発し，21 MPa印加時に各関節WAREC-1に近いそれより大きい発生トルクとなるように設定する．油圧脚口ロボットでは使用するサーボバルブの定格圧力から21 MPaでの利用とするが，各アクチュエータは35 MPaでの使用も可能である．

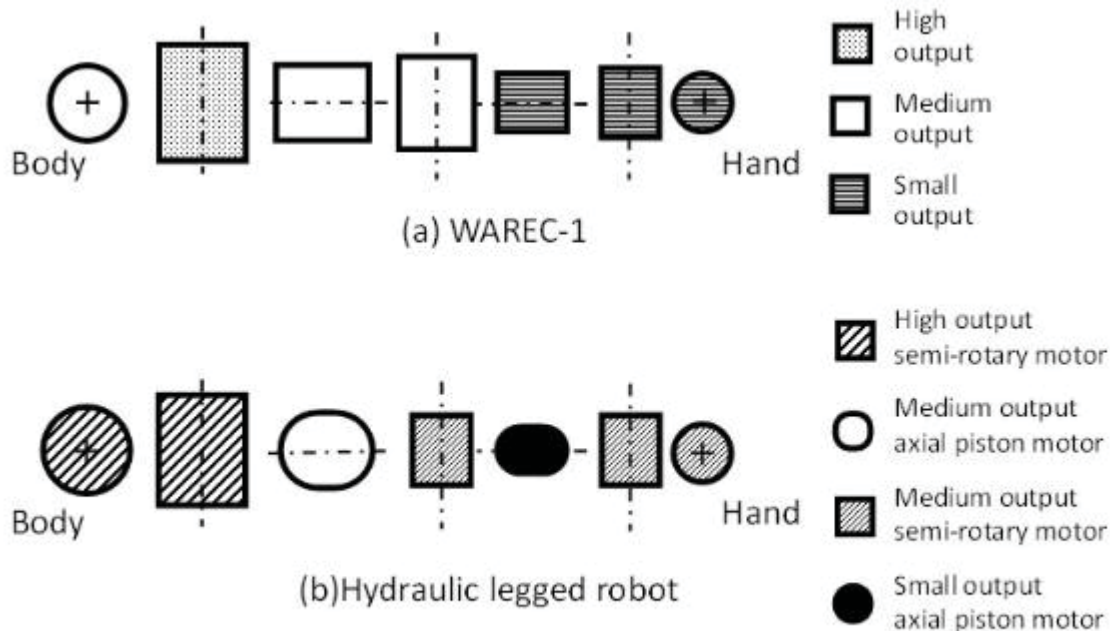


図2-7-50 Configuration of one limb of WAREC-1 and the hydraulic legged robot

油圧脚口ロボット一肢モデルには外部から油圧を供給し，各関節のアクチュエータに直接取り付けられているサーボバルブにより制御を行なう．油圧脚口ロボット全体を構成する場合にはポンプやその動力源も必要となるが，今回は開発対象とせず十分な容量のある油圧元を用いる．アーム先端のアクチュエータまで油圧を供給する必要があるが，関節の可動範囲が広いため単純に油圧配管を行なうことはできない．そこで，手首と肩の捻り方向の二回転が必要な部分は駆動軸周りに油圧ホースをまきつけることで回転を吸収する方法を取った．また，それ以外の関節には開発した1/8インチ規格小型スィベルジョイントを用いている．

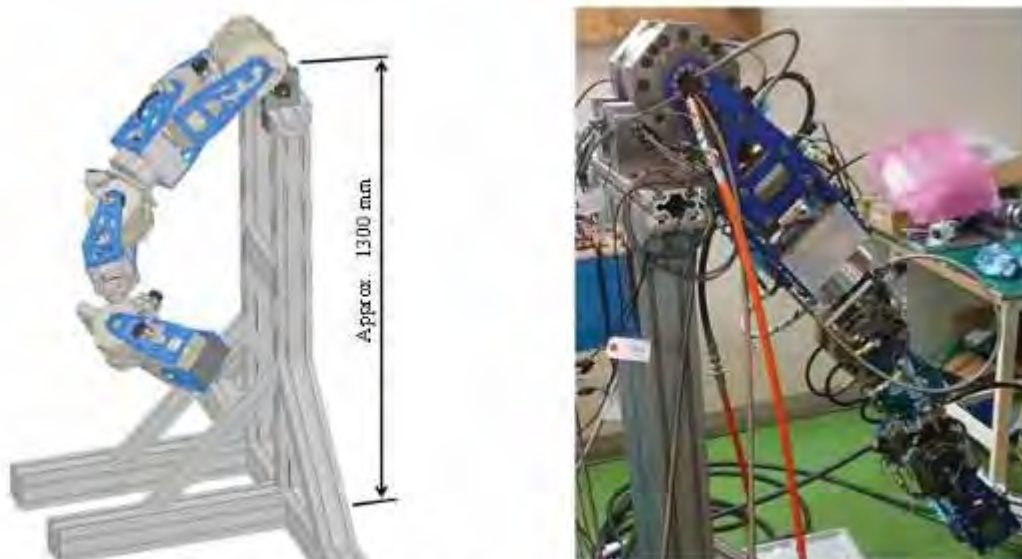


図2-7-51 Hydraulic legged robot one limb model

2-6-2) 制御系

油圧脚口ロボット肢モデル制御系の模式図を図2-7-52に示す。サーボバルブ(HS210, PSC製)とサーボバルブ制御基板(THVC:Titech Hydraulic Valve Controller, 図2-7-53), 磁気式エンコーダ(AksIM MHA8, RLS社製), 圧力計(NAT400.0A, Trafag社製)は各アクチュエータとその付近に分散して配置する。THVCは当研究室で開発されたサーボバルブ制御・駆動回路基板であり, 従来のサーボバルブ駆動回路よりもコンパクトかつ多機能化されている。個々の関節の制御をこのTHVCにより行い, 全体の制御はこれとCANにより接続したコントローラにより行う。制御基板以外のセンサ類には防水仕様のものを用いており, 簡単な対策でアーム全体を防水とすることができる。

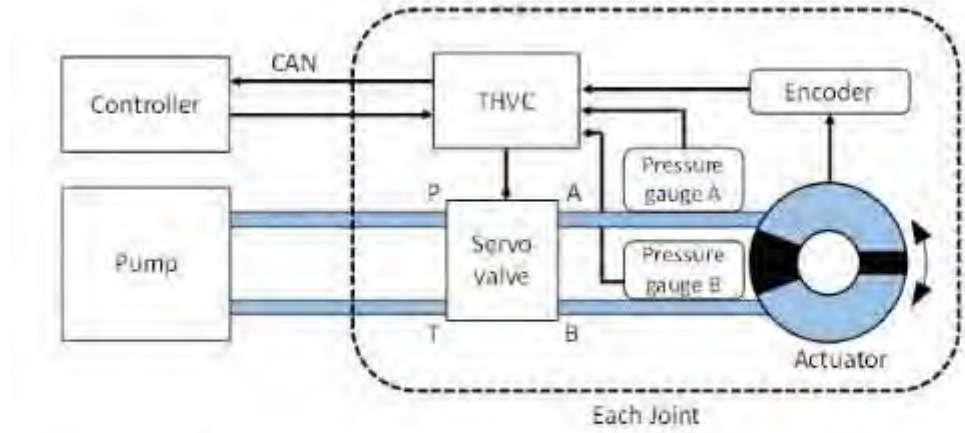


図2-7-52 Control system of Hydraulic legged robot

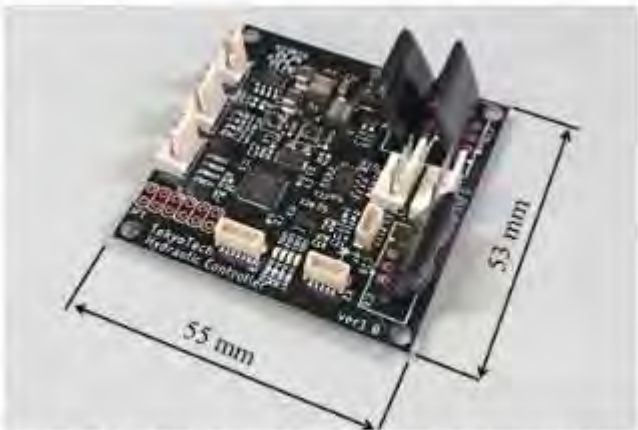


図2-7-53 Titech Hydraulic Valve Controller

2-6-3) WAREC-1との比較

WAREC-1と開発した一肢モデルの動作範囲を表2-7-5に示す。

表2-7-5 Operating range of developed single limb model and WAREC-1

	Body → Tip						
	Shoulder			Elbow	Wrist		
	Roll	Pitch	Yaw	Pitch	Yaw	Pitch	Roll
WAREC-1	-57 ~ 150	±107	±360	-38 ~ 163	±360	±93	±106
Hydraulic legged robot	-80 ~ 160	±109	±360	-41 ~ (163)	±360	-72 ~ (93)	-95 ~ 105

Numbers in parentheses are values under design.

手首軸の一部ではWAREC-1より小さい動作角度となるものの、他の部分では同じかそれよりも大きい範囲を取るよう設計されている。ただし、()内の数値は設計値である。フレーム強度、剛性の要求はWAREC-1と統一しているが、一肢モデル本体重量は約56 kg、全長は約1.2 mとなりWAREC-1の約33 kg、約1.1mよりも大型となった。これは開発するアクチュエータの種類を減らして元よりも大出力のものに置き換えたことや、揺動モータの重量があまり削減できなかったことが影響している。直動シリンダを用いればより軽量にできると考えられるが、今回は可動範囲とWAREC-1との互換性を優先した。開発した油圧アクチュエータとWAREC-1に用いられているアクチュエータのT/M比を図2-7-54に、パワー密度を図2-7-55に示す。パワー密度について、油圧アクチュエータの質量は本体質量にポートブロックとサーボバルブ(HS210, PSC製)を足したものであり、出力はサーボバルブの特性から求めた供給圧力21 MPaでの最大出力である。図2-7-54のT/M比では、開発したアクチュエータはWAREC-1のアクチュエータとほぼ同じかそれより悪い結果となっているが、図2-7-55のパワー密度では全てのアクチュエータで性能を改善できている。

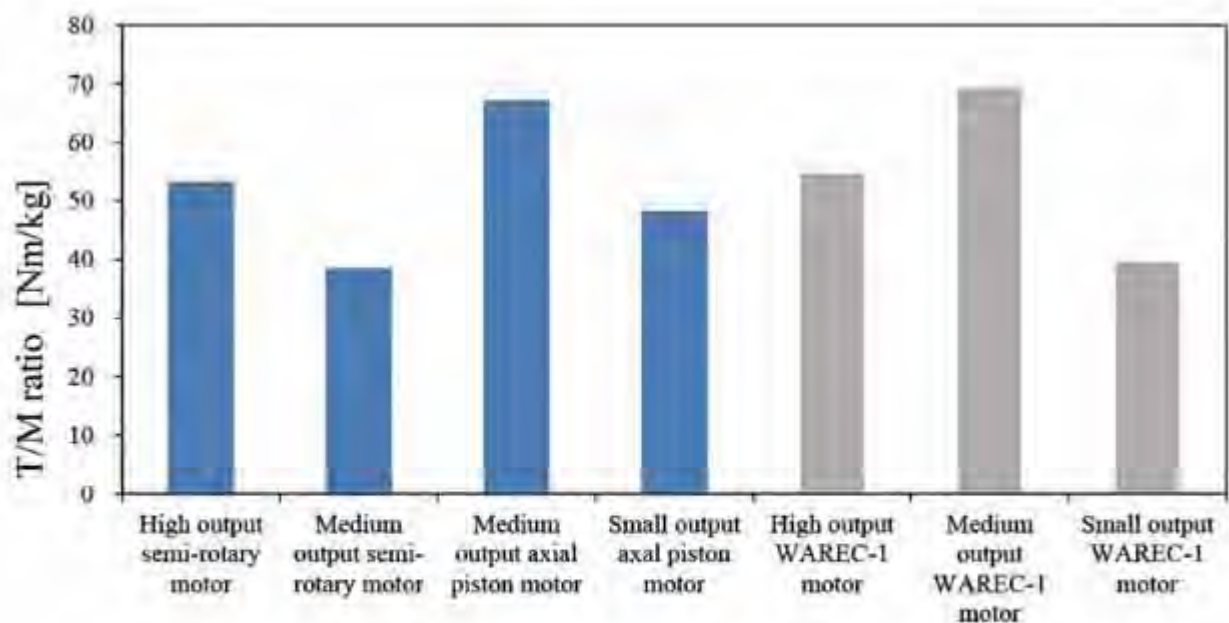


図2-7-54 Comparison of T/M ratio ($P_s = 21$ MPa)

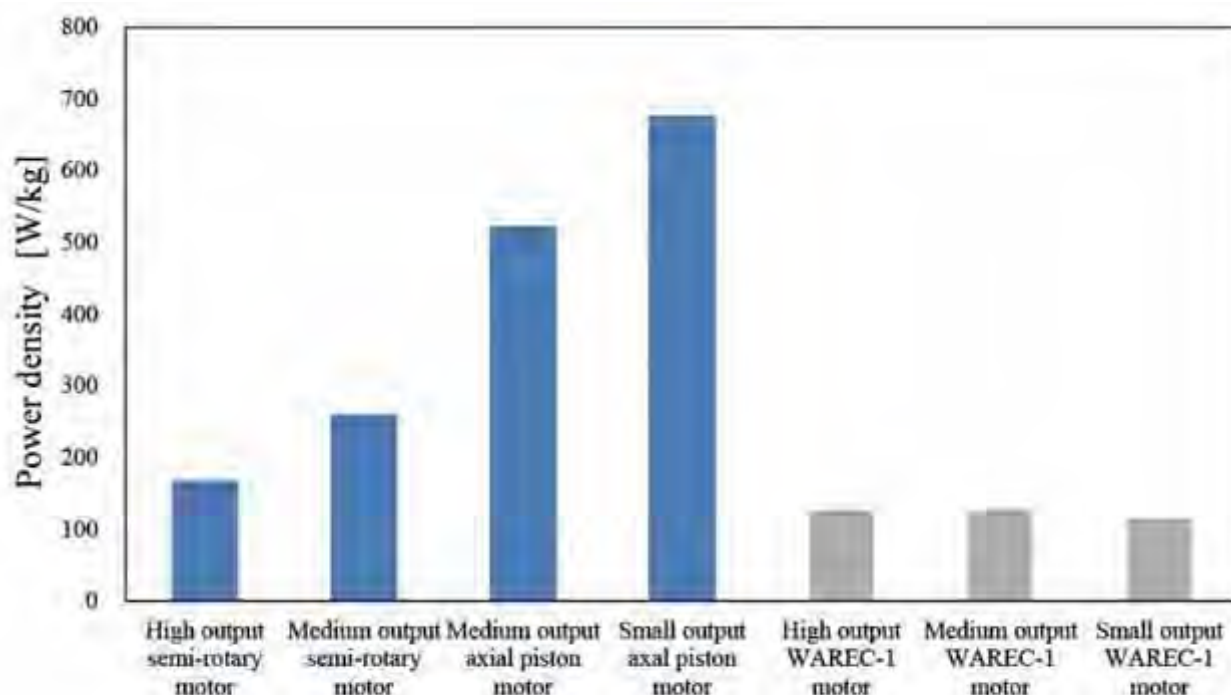


図2-7-55 Comparison of power density ($P_s = 21$ MPa)

図2-7-56に逆作動に必要なトルクの比較を示す。本比較に関しても従来のWARECのモータに比べ非常に小さな値となっており、逆作動性を大きく向上することができていると言える。

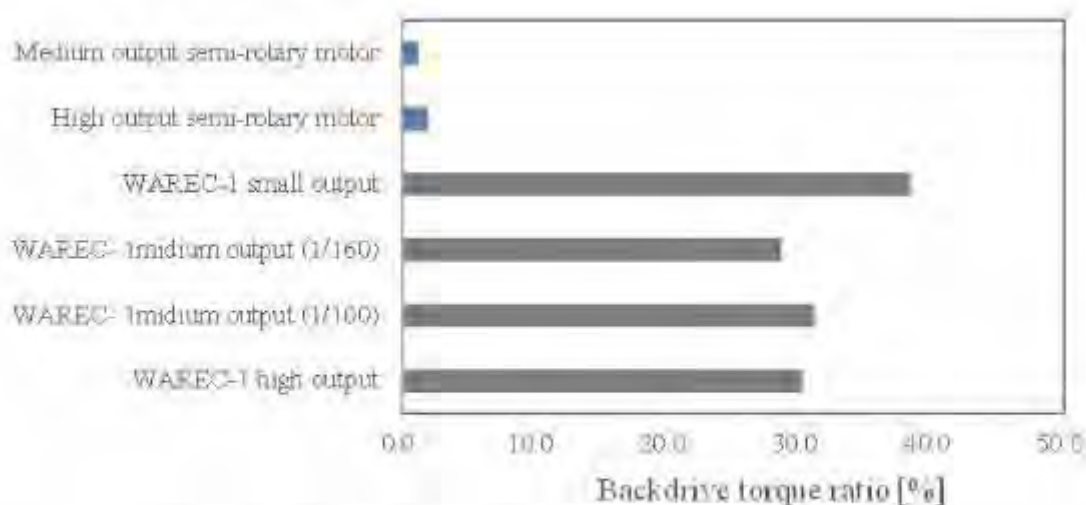


図2-7-56 Comparison of backdrive torque ratio

2-6-4) 評価試験

試作した一肢モデルの耐衝撃性及び高出力性の評価試験として、コンクリート板の破砕試験を行った。厚さ30 mmのコンクリート板を三枚重ねたものを固定し、試作機によって破砕を試みた。試験の様子を図2-7-57に示す。本体の損傷なくコンクリート板を破砕することに成功した。



図2-7-57 Breaking demonstration of the prototype

3) 成果の活用

次のように成果活用が行われた。

3-1) 低摺動・高出力油圧シリンダ・モータ，小径高压油圧ホース・継手

- ・研究成果の社会展開を目的としたベンチャー企業を 2018 年 10 月に設立した。
- ・A 社より，産業用油圧ロボットの開発に応用したいという問い合わせを受け，上記ベンチャーで受注した。
- ・B 社より，重量物運搬用歩行ロボットの開発に応用したいという問い合わせを受け，成果の適用を検討した。

3-2) 油圧人工筋

- ・産業界からの活用の要請，相談，それに対する対応

タフ・ロボティクス・チャレンジのフィールド評価会，展示会（2018 年テクノフロンティア展/東京工業大学鈴森教授共同，2018 年 Japan Robot Week）の場を起点とし，問い合わせを受けており，具体的な用途（一般産業用途と推察），仕様などのディスカッション実施予定。

- ・災害やプラント現場等への適用，訓練，試験，ユーザとのコミュニケーション

災害現場への適応を目指す用途に応用したいという問い合わせあり。今後ディスカッションを開始する予定。

3-3) 圧電振動子駆動微粒子励振型小型制御弁

・評価会での際の展示・実演の際，また展示会出展時には，駆動原理，構造および小型・軽量であることに関する質問を多くうけた。また，現状では対応できる作動流体の最大の供給圧力が数 MPa 程度であることから，高压化への見通しに関しても質問をうけた。ImPACT の研究課題として取り組んだように，この制御弁についてパイロット弁としての活用を期待する意見も多かった。

・ImPACT での成果に関連して，家電メーカ X 社から冷媒の流量制御に使用できないかとの問い合わせがあり，意見交換を行った。ImPACT での研究はアクチュエータ駆動用の制御弁としての使用に関するものであったが，流量，あるいは作動流体の供給圧の制約にこだわらず，小型・軽量であることに注目を受けた事例が多い。

(8) シミュレータ

1) サマリー

災害対応ロボット開発における、開発期間とコストを削減し、安全性を向上させるために極限環境におけるロボットの活動を再現可能なシミュレータの開発を行った。シミュレータのフレームワークとして産業技術総合研究所が以前より開発している Choreonoid を用い、(a)ロボット用ミドルウェアである ROS に対応したソフトウェア資産の活用を可能にするための ROS との接続インタフェース、(b)極限環境における炎や煙等が視覚に与える影響、ロボットの特殊な視覚機能をシミュレートするための描画エンジン、(c)立体積等に基づいて相互作用力を安定かつ実用的な精度と処理時間で計算する物理エンジン、(d)ミクロ・マクロアプローチに基づいて掘削現象を効率的且つ正確に計算する物理エンジン等の開発を行った。開発成果は TRC 内で共有し各種検討に用いると共に、オープンソースソフトウェアとして公開し、World Robot Summit 等でも活用された。

2) 技術的成果

2-1) ROS との接続インタフェース

近年海外を中心にロボット用ミドルウェアである ROS が広く利用され、多くのソフトウェア資産が蓄積されている。このソフトウェア資産を利用可能とするため、Choreonoid と ROS の接続インタフェースを開発した。ROS コミュニティではシミュレータとして Gazebo が広く用いられている。Gazebo そのものは ROS とは独立したソフトウェアであり、これを ROS と組み合わせて利用できるようにするため、gazebo_ros_pkgs と呼ばれるソフトウェアが提供されている。Gazebo ユーザの Choreonoid への移行を容易するため、gazebo_ros_pkgs の Choreonoid 版、choreonoid_ros_pkg を開発した。choreonoid_ros_pkg が提供している主な機能は次の通りである。

- ロボットのセンサ情報、アクチュエータへの指令の ROS トピックによる入出力機能
- シミュレーション世界での時刻や各モデルのリンクの状態の出力機能
- シミュレーション世界へのモデルの追加／削除、シミュレーションの一時停止、一時停止解除などのシミュレーション設定機能

1 つ目はシミュレーション世界のロボットを ROS によって制御するために必須の ROS との接続機能であり、残り 2 つは Gazebo のユーザが Choreonoid を使用する場合に移植の手間を削減するための移植支援機能である。

2-1-1) ROS との接続機能

ROS ではノード間の通信方法として Publisher/Subscriber という仕組みが提供されており、これらの間で受け渡されるデータはトピックと呼ばれる。シミュレーション世界に存在するロボットを ROS で記述されたソフトウェアで操作するため、gazebo_ros_pkgs は Publisher を用いてシミュレータからセンサ情報を出力し、制御ソフトウェアが Publisher から出力しているアクチュエータに対する指令を Subscriber で受け取り、シミュレーション世界のロボットに渡せるようにしている。これと同等の機能を提供する Choreonoid の機能として、BodyRos アイテムを開発した。このアイテムをシミュレーション世界に存在するロボットに対応するアイテムの子アイテムとして設定することで、センサ情報がトピックとして外部に出力され、アクチュエータへの指令をトピックの形式で受け取ることができるようになる。サポートしているセンサとそのセンサから出力されるトピックの型の対応を表 2-8-1 に示す。

表 2-8-1 サポートするセンサタイプと対応するデータ型

Sensor type	Topic type
Acceleration Sensor	sensor_msgs/imu
Gyro Sensor	sensor_msgs/imu
Force Sensor	geometry_msgs/Wrench
Camera	sensor_msgs/Image
RGBD Camera	sensor_msgs/PointCloud2
Range Sensor	sensor_msgs/LaserScan
Joint State	sensor_msgs/JointState

2-1-2) Gazebo からの移植支援機能

シミュレーション世界の時刻や各モデルのリンクの状態の出力機能はセンサ情報等と同様にトピックとして出力される。これらの情報を出力するアイテムとして WorldRos アイテムを開発し、これをシミュレーション世界全体に対応する World アイテムの子アイテムとして設定することで情報が出力されるようにした。出力しているデータとそのトピックの型の対応表を表 2-8-2 に示す。

表 2-8-2 サポートするシミュレーションデータと対応する型

Data	Topic type
Clock	rosgraph_msgs/Clock
Model States	gazebo_msgs/ModelStates
Link States	gazebo_msgs/LinkStates

シミュレーション世界へのモデルの追加／削除、シミュレーションの一時停止／解除などのシミュレーション設定機能については、ROS のサービスと呼ばれる機能を用いて実装されており、gazebo_ros_pkgs が提供しているサービスと同一のインタフェースを持つサービスを WorldRos アイテムに実装した。

これらに加えて Gazebo からの移植を容易にするには、Gazebo で用いられている SDF や URDF で記述されたロボットや環境のモデルが Choreonoid で利用できる必要がある。Gazebo 用のモデルファイルを Choreonoid 用のモデルファイルに変換するプログラム、simtrans が既に存在しているが、ユーザーの利便性の観点からは Choreonoid が直接 Gazebo 用のモデルファイルを読み込むことが望ましいため、これを実現するための Choreonoid の拡張機能、SDF ロードプラグインの開発も行った。

図 2-8-1 に ROS との連携機能を組み込んだ Choreonoid の実行画面の例を示す。背面のウィンドウが Choreonoid の画面であり、左側前面のウィンドウが ROS の可視化ツールである Rviz の画面である。シミュレーション世界に存在するロボットに搭載された RGBD カメラからの情報、ロボットのリンク状態の情報を用いて、ロボットと RGBD カメラからのセンサ情報が表示されていることが分かる。

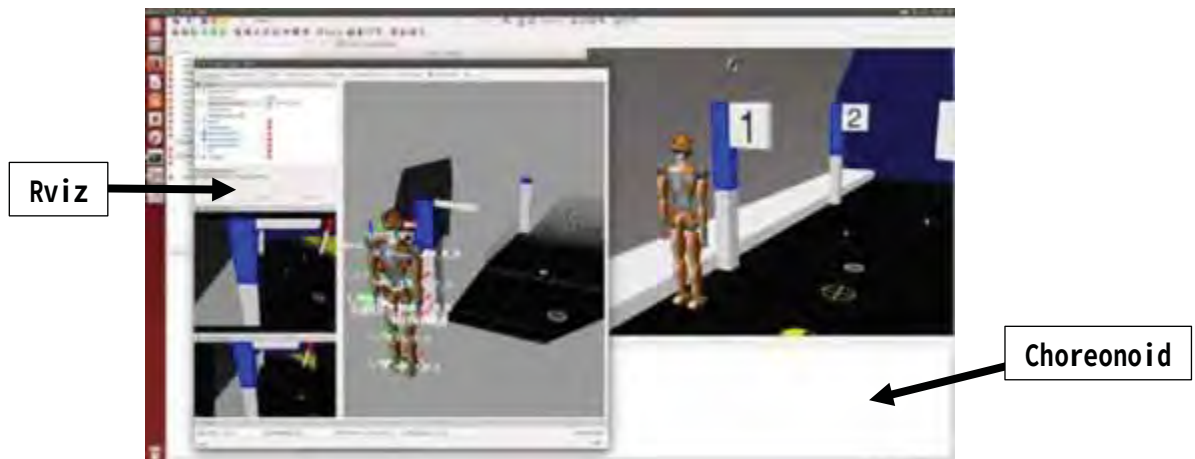


図 2-8-1 Choreonoid によってシミュレートされたセンサ情報の Rviz による可視化

2-2) 描画エンジン

2-2-1) 描画エンジンでのシェーダの活用

従来の描画エンジンは OpenGL 1.x 系の API を用いて実装されていた。この API ではグラフィックハードウェアである GPU 上の処理内容が組み込まれており、一般的な描画処理を比較的手軽に記述することが可能である。一方でこの API では GPU 上の処理内容を変更することができないため、描画可能な表現は限定的なものになってしまう。そこで、OpenGL 3.3 以降の API とシェーディング言語（シェーダ）GLSL を用いて描画エンジンを再構築した。これによりシェーダをベースとした描画を行

えるようになり、影や各種自然現象等の高度な描画表現をシェーダによって実現する基盤を整えることができた。

2-2-2) 光源の影響のシミュレーション

従来の描画エンジンでは光源からの反射成分の計算を頂点単位で簡易的に行う方法（グーローシェーディング）を用いていたが、プログラマブルシェーダを用いることでフォンシェーディングによりピクセル単位でより正確に計算し、複数光源によって発生する影をシャドウマップを用いて描画することが可能となった。これにより、従来のものより現実に近いリアルな描画を実現した。この比較を図 2-8-2（左が従来の描画エンジン、右が新規開発の描画エンジンによるもの）に示す。



左：旧描画エンジンによる表現



右：新描画エンジンによる表現

図 2-8-2 描画表現

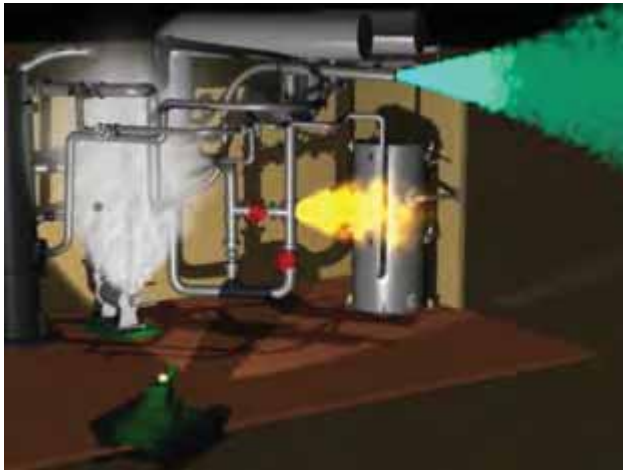
2-2-3) 霧、雨、雪等の自然現象の影響のシミュレーション

炎や煙といった物理現象は、3次元コンピュータグラフィックス(3DCG)においては一般的に「パーティクルシステム」と呼ばれる手法を用いて描画される。この手法では、適当な画像をテクスチャとして付与した点などの描画プリミティブを「パーティクル」とし、多数のパーティクルを位置やサイズ、透明度等を変化させながら同時に描画することで、様々な現象のアニメーション表現を行うものである。これは通常グラフィックスプロセッシングユニット(GPU)のプログラマブルシェーダを用いて実装される。GPU側での処理によってCPUに負荷を掛けずに数千個、数万個といったレベルの非常に多数のパーティクルをリアルタイムで処理することが可能となっており、さらにプログラマブルシェーダに与えるプログラムによって多彩な表現を行うことも可能である。

Choreonoid上でこの処理を実現するため、任意のシェーダプログラムをプラグインによって追加可能とする拡張機構を設計した。これを用いて自然現象を表現するパーティクルシステムをまとめたプラグインを開発し、そこに炎、煙、液体噴出、雨、雪に対応するパーティクルシステムを実装した。なお、パーティクルシステムの実装方法としては大きく分けてステートレスなものステートフルなものがある。前者はパーティクルの状態について初期状態以外はプログラムの変数として持たず、パーティクルシステムの状態(全パーティクルの座標やサイズ、透明度等)は時刻 t を変数とする解析的な式で表されるというものである。この場合、CPU側からは時刻 t を与えるだけでその時刻に対応する全パーティクルの状態を一気に再現することが可能である。一方ステートフルな実装では各パーティクルの状態を変数として有し、それが数値積分によって逐次的に更新されるというものである。この場合複雑な挙動も実装しやすいが、CPU側から時刻 t を与えるだけでその時刻の状態を即座に再現することは不可能となる。今回開発したシステムではステートレスな実装を採用しており、これによって低負荷でシミュレーション結果を再生することを可能としている。

プラント内で発生した災害を想定したシミュレーションの例を図 2-8-3 左に示す。ここではプラント内の配管や機器から炎や煙が発生し、液体が漏れ出ているという想定である。実際のシミュレーションでは、これらの現象がアニメーションとして動きを伴って表現される。また、これらの自然現象の実行結果もシミュレーションログとして保存されるため、ログの再生においては自然現象の挙動もシミュレーション時と完全に同じアニメーションとして、ロボットの挙動と同期して再現される。ま

た、屋外で雪が降る中での作業を想定したシミュレーション例を図 2-8-3 右に示す。これらのパーティクルシステムでは、それぞれ雨や雪の一粒一粒がパーティクルとして表現され、それらが大量に描画されることで雨や雪を表現している。有効半径や高さをパラメータとして有しており、それらのパラメータで示される領域内で現象が再現されることになる。



左：炎、煙のシミュレーション例



右：雪のシミュレーション例

図2-8-3 自然現象のシミュレーション例

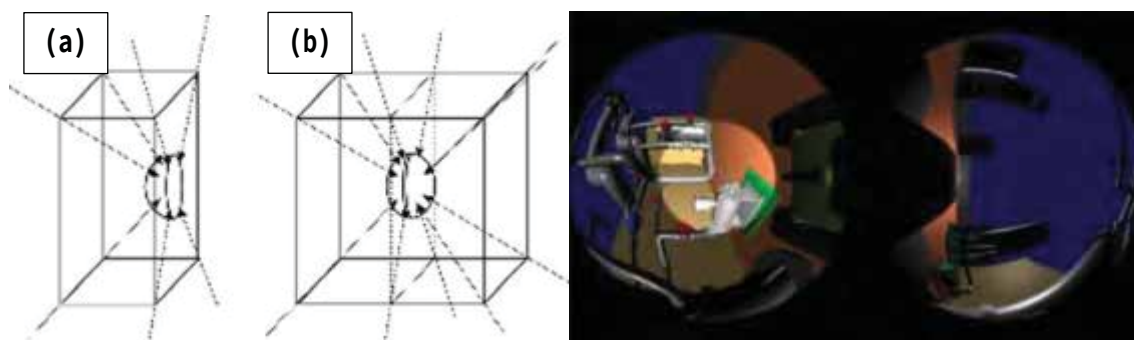
2-2-4) 広視野角視覚センサシミュレーション

一般的なカメラのレンズは透視投影によって画像を得ようになっている。通常の3次元画像描画システムはこれに合わせて設計されており、その出力結果をそのままカメラ画像のシミュレーションとして用いることが可能である。実際に Choreonoid でもシミュレーション結果表示用の描画システムを用いてカメラ画像のシミュレーションを実現している。ただし透視投影の場合視野角は原理的に180度未満に制限され、実際に実用となる視野角はそれよりもさらに小さい値となる。

透視投影のレンズよりも広範囲の領域を一度に撮影できるレンズとして魚眼レンズがあり、ロボットに搭載されて利用されることも多い。近年ではさらに2つの魚眼レンズを組み合わせることで周囲360度の画像を一度に撮影可能な「全天球カメラ」も開発されている。全天球カメラの製品としてリコー社が2013年に発売した Ricoh Theta があり、そのロボットへの搭載も試みられている。

そのような魚眼レンズを用いたカメラのシミュレーションを実現するにあたって、通常の透視投影に基づく描画システムをそのまま用いることはできない。現行の GPU は頂点座標の線形補間によってラスタライズや深度バッファの処理が行われる設計となっているため、たとえ GPU のプログラマブルシェーダを用いるとしても、魚眼レンズと同様の等距離射影等の射影方式を直接実装することは不可能となっている。ソフトウェアレンダリングでこれを実現しようとする処理が極端に重くなり、リアルタイムシミュレーションを実現することが困難となる。

そこで、通常の透視投影による描画を複数の投影面に対して行い、それらの画像を統合することで、魚眼レンズを用いたカメラ画像のシミュレーションを実現することとした。図 2-8-4 左の(a)は画角180度の魚眼レンズの画像を得るための構成を示している。ここで中央の半球状の物体をレンズとすると、その正面方向にある面が通常の透視投影で用いられる投影面を表している。この投影面だけでは180度分の画角をカバーすることができない。そこでレンズの上下左右にも投影面を設け、それぞれの視体積が画角内の空間を排他的にカバーするような投影によって3次元物体の描画を行う。すなわち、ひとつのレンズのシミュレーションに全5面分の描画を行う。そのようにして生成された各面の画素から、魚眼レンズに対応するマッピングを介して、最終的なカメラの画素値を得るものとする。なお、上下左右の面に関しては魚眼レンズの画角がカバーする領域のみを描画すればよい。例えばレンズの画角が180度の場合は、上下左右の面はそれぞれ前方側半分の領域を描画する。



左：魚眼レンズと投影面

右：Ricoh Theta のシミュレーション例

図 2-8-4 魚眼レンズのシミュレーション

Theta カメラに関しては魚眼レンズを前後に 2 つ配置し、それによって得られた画像を統合することで、全天球カメラを実現している。図 2-8-4 左の(b)はこの画像を生成する際の描画面の配置である。単一の魚眼レンズの場合と比較すると、上下左右の描画面を

カメラの後方にも拡張し、さらに後方の領域をカバーするための面を追加して、全部で 6 面分の描画となる。これについてもカメラの画素へのマッピングを同様に行い、最終的なカメラ画像を得る。

この手法を Choreonoid 上に実装し、ロボットモデルで利用可能なカメラのタイプに魚眼レンズのものや全天球カメラを追加し、ロボットのシミュレーションの際にそれらカメラの映像もシミュレートできるようにした。この機能によってシミュレートされた Theta カメラの画像を図 2-8-4 右に示す。Theta カメラのハードウェアが直接出力する画像はこの図に示すように魚眼レンズ 2 枚分の画像を並べたものとなっている。Theta カメラでは付属のアプリケーションでパノラマ画像も得られるようになっているが、それは上記の出力からソフトウェア的に処理されるものとなっている。ロボットでパノラマ画像を利用する際には別途同様の画像処理が必要となるが、これは実機でもシミュレーションでも変わらない。なお、本手法ではカメラ一台分の画像を生成するのに内部で 5~6 枚分の画像を描画しなければならないため、通常のカメラと比較するとそれだけ処理が増えることになる。ただし近年の GPU は非常に高い処理性能を有しており、よほど複雑なモデルや高い解像度でなければ、一般的なカメラのフレームレートである 30[hz]程度を実現することは容易である。Choreonoid においては、描画に必要な GPU のリソースを共有したり、描画部分をスレッド化したりすることで、実用的なシミュレーション速度を実現している。

Choreonoid は以前より測域センサのシミュレーション機能を有している。これはセンサの計測対象となるシーンについてセンサの視点からの 3 次元描画を行い、その際に生成される深度バッファ(Z バッファ)の値を参照することでセンサと環境との間の距離を得るというものである。この概要を図 2-8-5 左の(a)に示す。ここでシリンダ状の部分はセンサを表しており、矩形領域はセンサ視点からの描画面である。この描画面の深度バッファはセンサから物体への距離を表しており、これは測域センサで計測される値に対応する。

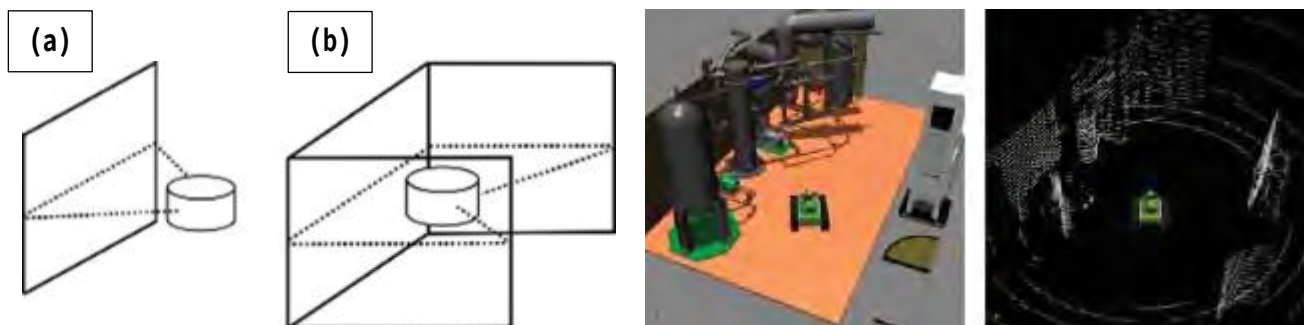
この機能についても、前節で述べたように単一の透視投影の対象となる領域は視野角 180 度未満の領域に制限される。さらに描画面の端に近づくほど深度バッファの解像度は粗くなるため、精度を考慮すると 180 度未満であってもあまり大きな視野角をとることはできない。これに対して、近年測域センサの計測範囲は広がっており、上記の制約を超える視野角を有するものも多く、さらにセンサ周囲の 360 度を計測可能なものまで開発されている。例えば Velodyne 社が開発した VLP-16 という製品では、水平方向に 360 度、垂直方向に ± 15 度の範囲を一度に計測可能である。このセンサは実際に自動運転車やドローン、ロボット等に搭載され活用されており、このようなセンサのシミュレーションに対する需要も高まっている。

その需要に応えるため、魚眼レンズと同様に複数の描画面を用いる手法によって広視野角測域センサのシミュレーションを可能とした。図 2-8-5 左の(a)は描画面を 1 枚だけ用いる場合を示しており、センサの計測範囲はあまり大きくとることができず、主にセンサ前方の領域に限定される。これに対して、図 2-8-5 左の(b)のように 3 枚の描画面を用いることで、センサ斜め後方の領域にも対応可能となる。なお、魚眼レンズのシミュレーションにおいてはレンズの上方、下方をカバーするための描画面も用いており、描画面の総数が多くなってしまっていたが、測域センサについては水平方向をカバーする描画面のみを追加しており、描画面の総数は比較的少なく済むようになっている。こ

れは一般的に測域センサの垂直方向の計測範囲が限定されているためである．実際に多くのセンサの垂直解像度 1 であり，この場合描画面の縦方向解像度も 1 となる．それより大きな解像度を得るためには複数のレーザーを同時に照射する必要がある．VLP-16 は 16 本のレーザーを用いることで垂直方向の解像度を 16 としているが，それでも垂直方向の視野角は最大で 30 度となっており，描画面を上下に追加することなく対応可能である．

Choreonoid の実装においては，水平方向の計測範囲と使用する描画面の数について，90 度までは 1 面，180 度までは 2 面，270 度までは 3 面とし，それ以上は 4 面を用いてシミュレーションを行うものとした．これにより，広視野角の測域センサを十分な精度でシミュレートすることが可能となっている．

シミュレーションの例を図 2-8-5 右に示す．左はシミュレーション対象となる環境を示しており，この中央付近にモバイルロボットが投入されている．このロボットには VLP-16 の仕様に沿った測域センサが搭載されており，右はこのセンサによる計測結果のポイントクラウドを示している．この結果より，センサの周囲 360 度の環境の計測をシミュレーションできていることが分かる．



左：センサと投影面

右：Velodyne VLP-16 のシミュレーション例

図 2-8-5 視野角の大きい測域センサのシミュレーション

2-3) 極限環境におけるロボットと環境の相互作用力計算

極限環境において想定される，ロボットを含む多数の物体が複雑に接触し相互作用する状況を，安定かつロボットの制御に必要な精度で，実用的な計算時間でシミュレートするための基盤アルゴリズムを開発した．瓦礫が散乱した環境や，砂礫や泥土に覆われた地面環境における移動・作業，物体の破壊や切断といった現象のシミュレーションを可能とするため，次の 4 つの課題に取り組んだ．

2-3-1) 干渉している物体対の立体積に基づく接触力の高精度計算

災害現場に散乱する瓦礫や建造物等とロボットが複雑に接触しながら活動する状況を想定し，接触力（垂直抗力および摩擦力）を計算する．研究開発担当者は本事業開始前までに，干渉している物体対に作用する接触力を安定かつ比較的高速に計算するアルゴリズムを開発していた．これは物体運動の発散や接触力の不自然な偏りを防ぐ作用を持ち，数値計算の観点からも力学的観点からも好ましい性質を有する．ただし，物体間の接触は点対面のみで表現されており，上記の状況で生じ得る複雑な接触条件を扱えなかった．そこで，多面体として表現される物体対の相互干渉状態ならびに接触力を，相互侵入している二つの多面体の論理積（立体積）に基づいて高精度に推定・計算するアルゴリズムを開発した．

上述の立体積の部分は，現実には物体間の相互圧縮によるわずかな歪みに相当し，接触力の方向や大きさ，合モーメントの満たすべき条件等を情報として含んでいる．これが精度向上の鍵となる．立体積計算は多くのシミュレータで用いられている点対面や面対面の干渉計算よりも複雑であるため，その効率を向上することが最初の課題であった．代表的な方法には，多面体を構成する面と頂点の双対変換および凸包計算を用いる Muller-Preparata 法，多面体の境界表現（B-rep）とその位相構造を用いる方法などがある．当初計画では Muller-Preparata 法を高速化して使用する予定であったが，その後の検討により，非凸形状にも適用できる B-rep に基づく方法の方が好ましいと判断し，実装した．高速化の工夫としては空間分割表現等を用いた．

上記に取り組む過程で、立体積を計算する前に、その対象となる干渉している物体対を高速かつロバストに検出すること（干渉判定）の重要性も認識された。以前は分野の標準的方法であるGilbert-Johnson-Keerthi法（GJK法）を用いていたが、よりロバストな方法として実用例が幾つか報告されているMinkovski Portal Refinement法（MPR法）を実装した。これによりGJK法よりもロバストに干渉判定を行えることを確認した。

この立体積の形状や時間変化に基づいて、両物体が1ステップ後にどのような相対運動量を持つべきかを決定し、最適化計算を行うことでそれを再現する運動を得る方法を開発した。物体対に作用する力積は、立体積の体積要素に作用する接触応力を合成（積分）することにより求まる。その際、接触応力に課せられる制約条件も合成する必要があるが、特にねじり摩擦トルクの扱いに不良設定性を伴う理論的困難があった。当初計画では立体積の表面積に基づいてこれを行う予定であったが、この考え方は誤りであり、物体対の共通断面形状に基づいて行うべきということが早い段階で判明した。摩擦円錐を多角錐で近似することでこれを実装し、複雑形状同士の接触をある程度の精度を以て再現することができた。また、静止摩擦／動摩擦の切り替えを力情報のみに基づいて行うようにし、接触点の微小な摂動を静止摩擦条件のままで抑制することが可能になった。

上記最適化計算に用いる解法群の改良も行った。基本となる反復勾配法の各ステップにおける勾配方向最小化に用いる直線探索法を改良することで、ロバスト性を大幅に向上した。

以上の方法により行ったシミュレーションの例を図2-8-6～2-8-8に示す。図2-8-6および図2-8-7は、段状の地面の角部にロボット自身や操作物体が接触した場合に、従来方法では法線力が作用する方向を誤って推定しているのに対し、提案方法では合理的な同方向を推定できている様子を示している。また図2-8-8は、箱状物体を水平面上でスピンさせた状況をシミュレートした例である。この場合では並進摩擦力とねじり摩擦トルクとが干渉するため、静止摩擦により物体を拘束できる境界を推定することが難しい。同図右に示したように、提案方法では摩擦円錐を近似する多角錐の頂点数を増やせばその境界に漸近する。ほか、箱状物体を水平面上で引き摺る状況をシミュレートし、解析解と比較して十分精度が得られること及びstick-slip現象も再現できることを確認した。

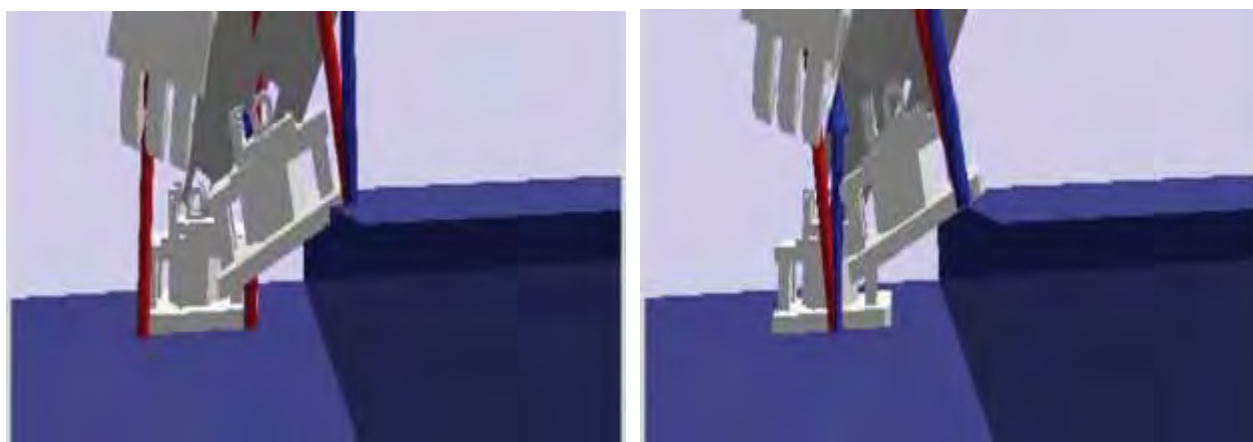


図2-8-6 段差エッジ部に人型ロボットが乗り上げた状況。従来方法（左図）では法線力の作用方向（青矢印）が鉛直上向きとなっているが、提案方法（右図）では足底に垂直な方向となっており、より合理的である。

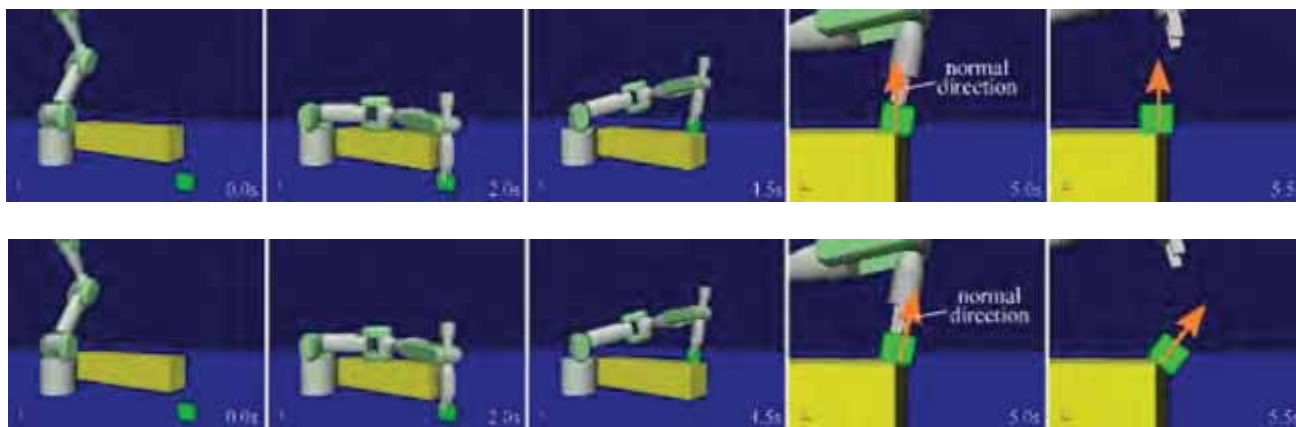


図2-8-7 マニピュレータにより物体を段差エッジ部に置いた状況．従来方法（上図）では法線力の作用方向（橙矢印）が段上面に垂直となっているが，提案方法（下図）では物体底に垂直な方向となっている．

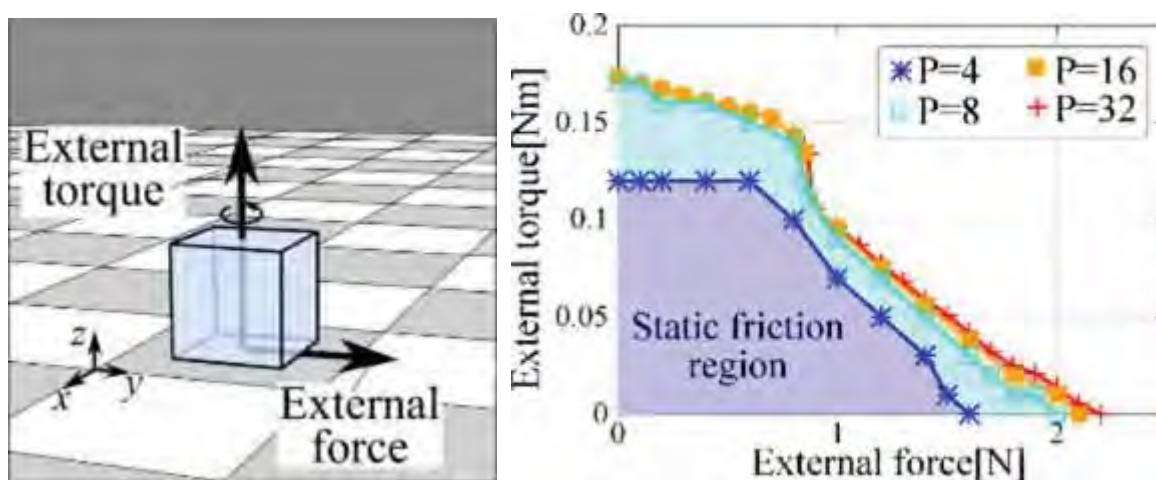


図2-8-8 箱状物体を水平面上でスピンさせるシミュレーションの結果．静止摩擦により物体を拘束できる領域の上界が，摩擦円錐の近似多角錐頂点数を増やすことによってある曲線に漸近している（右図）．

建設ロボット開発グループからシミュレーションシナリオ，ロボットモデルファイル，環境モデルファイルおよび制御ソフトウェアの提供を受け，上記方法を用いてロボットハンドにより地面を掻く作業をシミュレーションした様子を図2-8-9に示す．従前の実装では接触力が激しくチャタリングしたが，提案方法では比較的穏やかに変化した．なお，この穏やかさは接触部分の歪みエネルギーを散逸させる係数により調整可能であり，逆に従前のようなチャタリングを起こさせることも可能である．従前の方法では逆は不可能であることも指摘しておく．

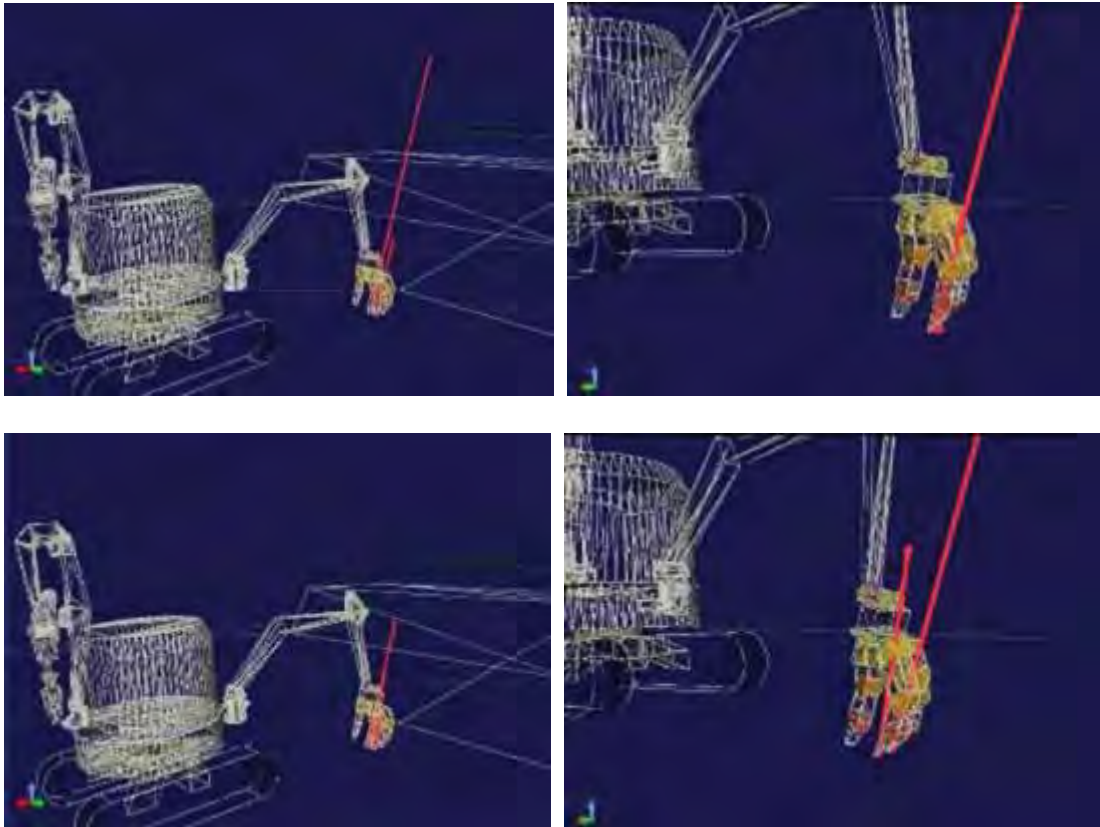


図2-8-9 建設ロボットにより地面を掻く作業のシミュレーションの様子。従前の実装（上図）では接触力が激しくチャタリングしたが，提案方法（下図）では比較的穏やかに接触力が変化している。

2-3-2) 大変形する地盤との相互作用計算

砂礫や泥土に覆われた大変形する地盤上でロボットが活動する状況を想定し，地盤とロボットとの相互作用により発生する接触力および地盤の3次元変形量を実時間の数倍程度で計算する，新たなモデルおよびアルゴリズムを開発した。

まず既存技術の利用可能性を確認するために，地盤を構成する無数の砂粒や土粒を個々にモデル化し，それらの運動を詳細に追跡する個別要素法を実装した。数万個の要素間の相互作用を効率良く計算するために，空間パーティショニングや並列計算を導入した。これにより，それまで行えなかった土の上を歩行するロボット運動のシミュレートが可能になった。その様子を図2-8-10に示す。一方で，剛体運動のシミュレーションが1ms時間幅で行えていたのに対し，本方法によるシミュレーションでは微小な粒子同士を安定に反発させるために1 μ s程度の時間幅にする必要があること，従ってこの方法のみでは実時間の数倍程度で計算するという要求を満たせないことが分かった。

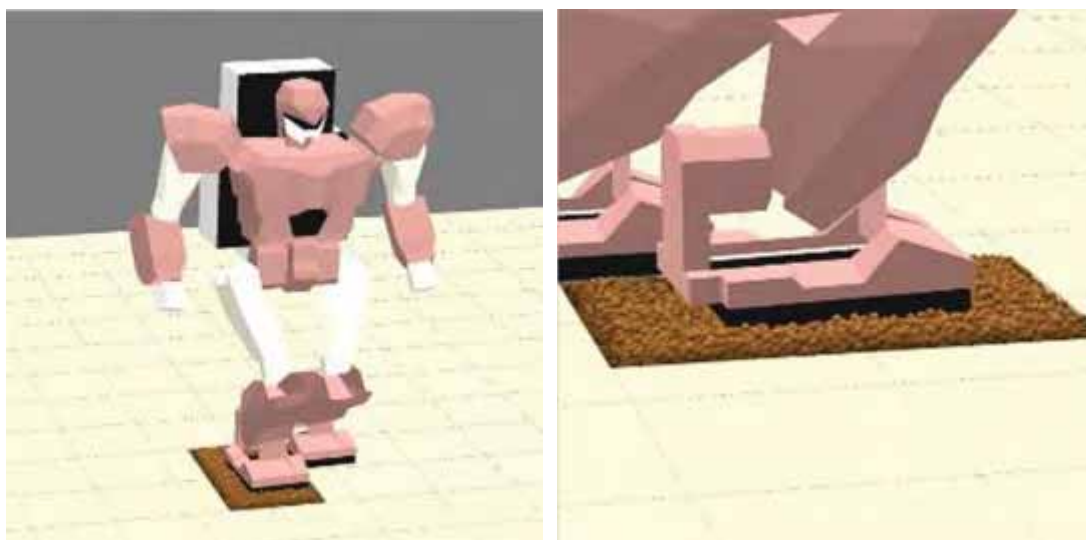


図2-8-10 個別要素法による地盤変形計算とロボット運動計算とを連成させたシミュレーションの様子。ロボットのみであればシミュレーション時間幅は1msで十分行えたが，上記の例では時間幅は1 μ sまで短くしなければ安定な結果は得られなかった。

上記を踏まえ，地盤を連続体で近似し，剛体侵入部の局所的な形状計算から相互作用力を計算する方法を新たに考案・実装した．地盤への剛体侵入に対する抵抗力を地盤の塑性変形まで考慮して計算するため，Bekkerの実験式を拡張した式を新たに提案した．また排土抵抗力は土質力学におけるCoulombの土圧理論に基づいて計算した．侵入部の側面積と地盤の内部滑り角（物性値）のみから計算できる点に特長がある．剛体侵入部が地盤から受ける力は，これらの重ね合わせによって求まる．さらにNURBS曲面を用いて地面形状をパラメトリックに表現することで，再現可能な状況の幅を広げた．図2-8-11のような，土の変形と印加力を同時に計測する実験装置を製作し，実現象との比較を行った．その結果，図2-8-12のようにある程度の再現精度が達成されていることを確認した．提案方法を用いて，箱状物体を土に侵入させた後に水平に掃引する状況をシミュレートした様子を図2-8-13に示す．定性的に実現象に近い結果が得られたことも確認した．

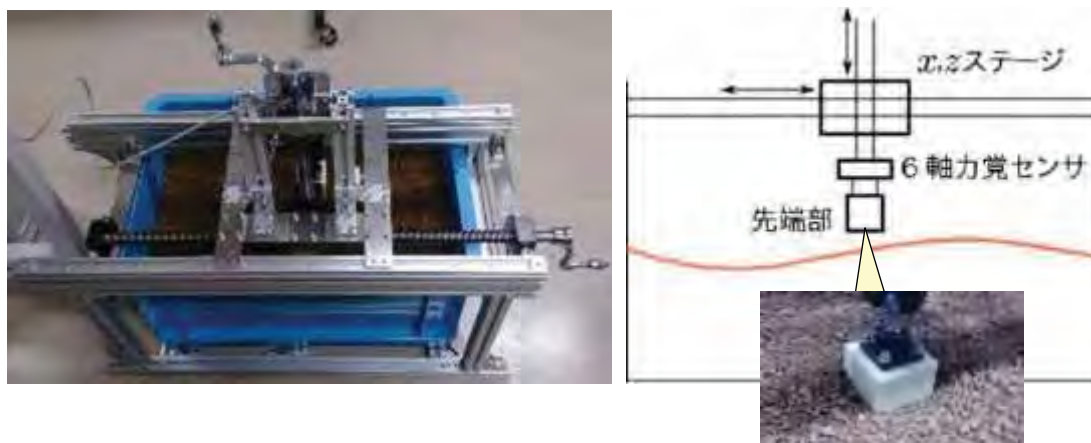


図2-8-11 土の変形と印加力を同時計測する実験装置．先端部のスタイラス形状を交換できる．

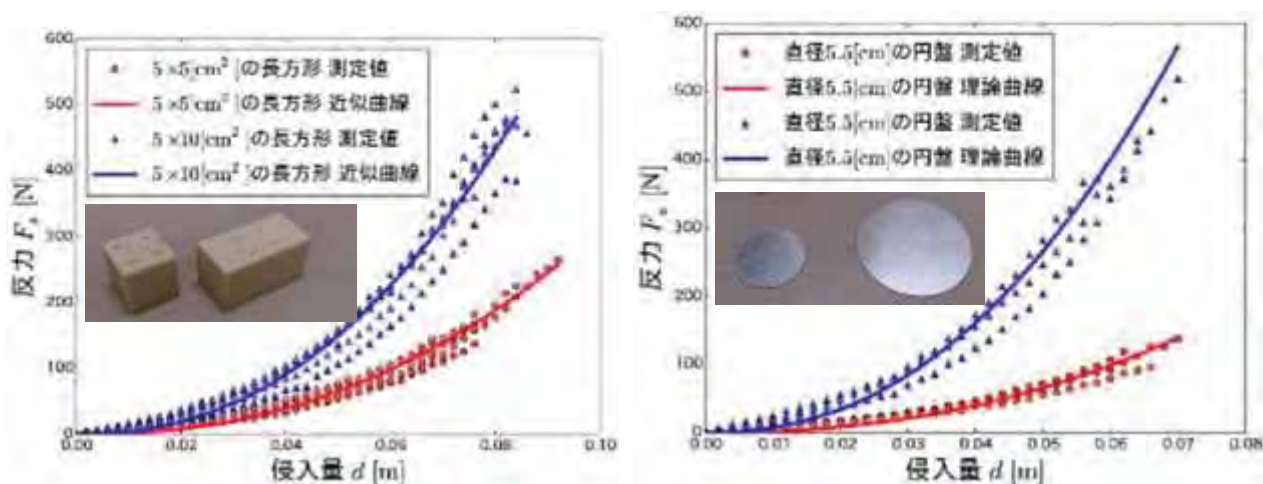


図2-8-12 拡張したBekkerの実験式を、四角形スタイラスを用いて実測した値にフィッティングさせた結果（左図）。それによって得られたパラメータに対し、円盤スタイラスを用いて実測した値を重ねた結果（右図）。

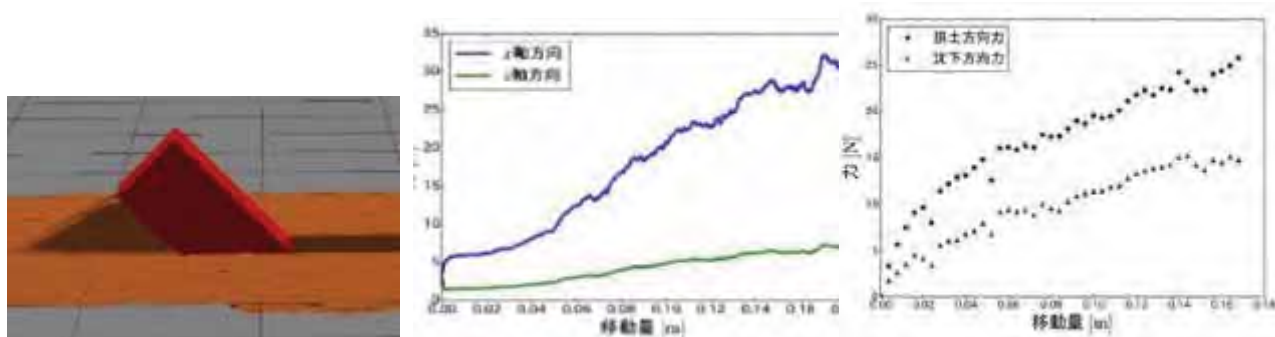


図2-8-13 箱状物体を土に侵入させた後に水平方向に掃引した状況のシミュレーションの様子（左図）。シミュレーションによって得られた抵抗力（中図）。同状況を再現したときの抵抗力の実測値（右図）。

2-3-3) 破断・切断を伴う物体の振舞計算

物体の破壊や切断も扱えるよう、剛体リンク系順運動学計算アルゴリズムを拡張した。破断の可能性がある物体内部の破断・切断箇所候補点を仮想関節として表現し、仮想関節に発生する6軸力が閾値を超えた時点で関節拘束を解除する、という簡易的な方法である。この方法を用い、ロボットが角材に力を加えて破断させる状況をシミュレートした様子を図2-8-14に示す。

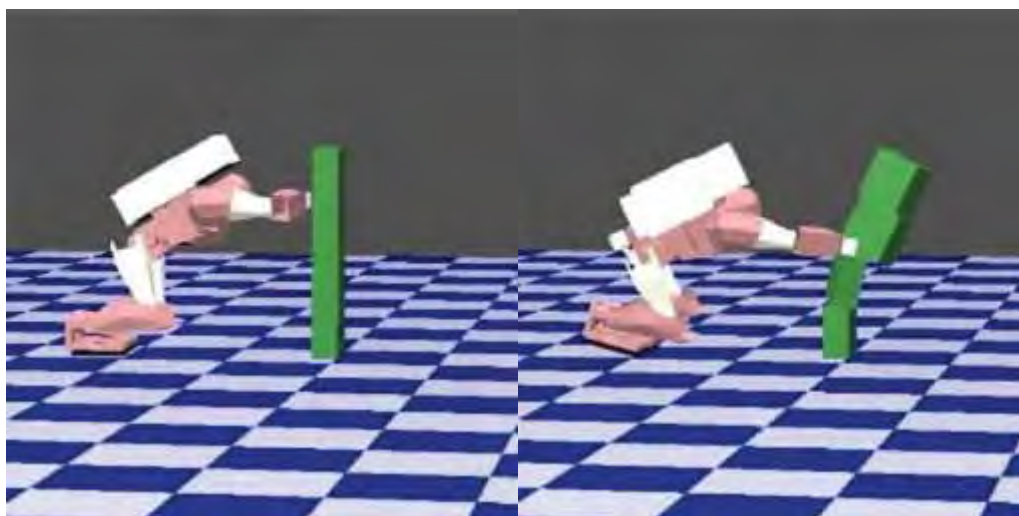


図2-8-14 ロボットが角材に力を加えて破断させる状況をシミュレートした様子。