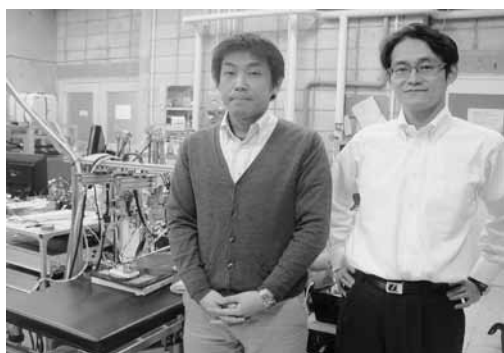




空気圧の有効利用を目指して

川嶋 健嗣 研究室～精密工学研究所



只野 耕太郎 助教 川嶋 健嗣 准教授

身の周りの機械は、電気やガソリンなどのさまざまな動力によって動いている。中でも、空気圧を動力としている機械は、非常に軽量であり、柔軟性に富んでいる点で特徴的だ。

川嶋研究室では、空気圧を動力として最大限に活用するための制御方法を研究し、研究で得られた知識を利用して実際に空気圧を動力とする装置の開発を行っている。本稿では、腹腔鏡手術を遠隔で行うことができる腹腔鏡手術ロボットを中心に、川嶋研究室で開発されている革新的な装置について紹介していく。



空気の特徴を活かした的確な制御

私たち人間は機械を動かすためにさまざまな種類の動力を利用している。身の周りにあるものでは、自動車を動かすガソリン、電車を動かす電気などが挙げられる。そういった主要な動力を利用した機械の他に、空気圧を動力として利用している機械も存在する。

空気圧は、加えた圧力に応じて体積が変化する容器に、空気の出し入れを行うことで、動力として利用することができる。空気を利用しているため非常に軽量であり、力を受けて空気の体積が変化するので柔軟性が高い。

一方で、この柔軟性という性質は空気の出し入れと力との対応が複雑になるという側面をもっている。そのため空気圧を利用して機械を動作させる場合、目標とする位置と実際に動いた位置との間にずれが生じてしまうことがある。一般的に機械動作のずれはセンサで認識して補正をかけるのだが、空気圧を動力とする機械の場合は、補正のために加える空気量の計算が複雑になるので制御が困難である。

川嶋研究室では、空気圧という扱いが難しい動力を制御する方法を研究し、そこで得た知識を応

用して、正確な動きを実現する装置の開発に機械面・制御面の両面から取り組んでいる。

開発が行われている装置の一つに空気圧を利用した腹腔鏡手術ロボットがある。これは、只野助教が修士課程の学生であった頃から研究開発を進めているものだ。現在、このロボットの評価実験をワシントン大学や東京医科歯科大学と共同で実施している。

腹腔鏡手術とは、患者の腹部に直径10 mm程度の穴を数箇所開け、そこから医療器具と内視鏡を入れて行う手術のことだ。腹部を切開することで患部を目視しながら手術を行う開腹手術と比べて、傷跡の縮小や痛みの軽減、術後回復の早さなど多くのメリットがあり、胆石症や胃がんなどの治療に用いられている。その一方で、腹腔鏡手術は内視鏡による間接視下での手術となるため、術者に高度な技術が求められるというデメリットもある。

腹腔鏡手術ロボットは、腹腔鏡手術を遠隔操作で行うという目的で作られたロボットである。このロボットには一般的にマスタ・スレーブシステムという方式が取り入れられている。

マスタ・スレーブシステムが取り入れられている装置は、操作を行うマスタ装置とそれに連動して動くスレーブ装置で構成されている。二つの装置間は、コンピュータを介してインターネット通信で接続されている（図1）。この方式を取り入れることで、術者と患者が離れていても手術を行うことができるようになる。

既存の腹腔鏡手術ロボットを用いて手術を行う際、術者は、医療器具にかかっている力を感じることができなかった。そのため、気付かないうちに臓器を傷付けてしまい、重大な医療事故に繋がってしまう危険性があった。

川嶋研究室で開発されている手術ロボットは、既存の手術ロボットの問題を解決し、新しいアイデアを取り入れて、直感的かつ正確な手術を可能にするさまざまな機能を備えている。中でも、動力である空気圧の柔軟性を活かし、医療器具にか

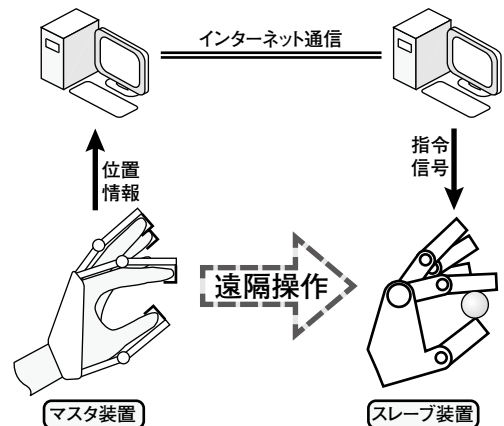


図1 マスタ・スレーブシステム

かっている力を術者に伝える力覚提示という機能を有していることが最大の特徴である。以下では、川嶋研究室で開発している腹腔鏡手術ロボットについて紹介していく。



ロボットによる快適な手術の実現

スレーブ装置

先程述べたように、川嶋研究室の手術ロボットは、術者が操作するマスタ装置とそれに連動して動くスレーブ装置の二つで構成されるマスタ・スレーブシステムによって遠隔での手術を可能にしている。初めにスレーブ装置について紹介する。

この手術ロボットのスレーブ装置は、患部に手術を施す装置である。縫合や牽引などに用いられる医療器具である鉗子^{かんし}というものが取り付けられた鉗子部が二つ、その間に内視鏡部が一つあり、各々を支える三つの保持部が並立した構造をしている。並立する三つの保持部のうち、鉗子部を保

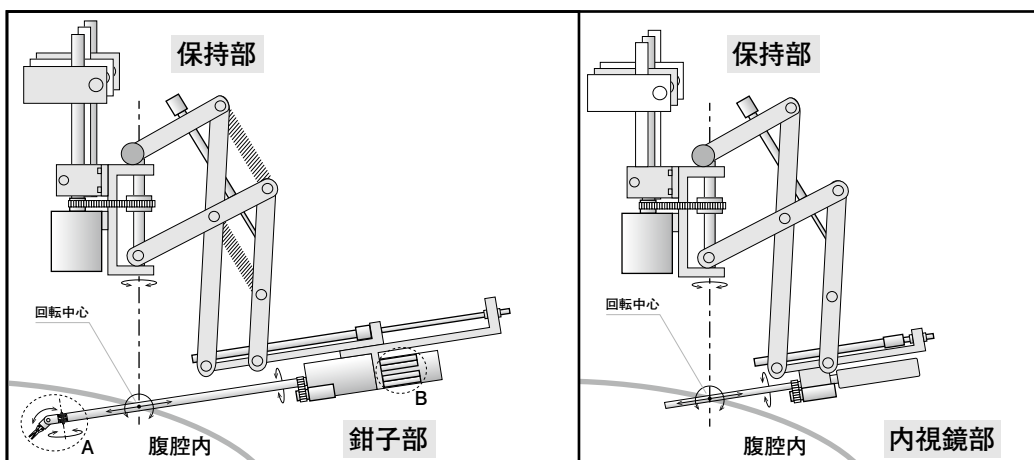


図2 手術ロボットのスレーブ装置

持っているものと内視鏡部を保持しているものを図2に示している。このスレーブ装置は、空気圧を利用して回転・直進の力を生じさせる、空気圧モータ・空気圧シリンダで動いている。

三つの保持部は、鉗子部と内視鏡部の動作の回転中心が一定に保てるような構造に設計してある。これは、手術で鉗子や内視鏡を入れるために開けた穴の位置を中心として、鉗子部や内視鏡部を動かす必要があるからだ。装置の構造によって決まる回転中心を利用することで、保持部の制御を簡単にし、装置全体としての制御を可能な限り単純化することができる。

では、手術時に腹腔内で動作する部位である鉗子部について紹介する。川嶋研究室で作られている鉗子部には、二つの関節と、それらを動かす空気圧シリンダが取り付けられている(図2-A、図2-B)。鉗子部の先端には縫合や牽引の際に必要なグリッパの他、メスなどのさまざまな医療器具を取り付けることができる。また、空気圧シリンダの力をワイヤによって関節に伝え、関節を回転運動させている。二つの関節を備え付けることによって腹腔内での鉗子の位置や向きを自由に変えることができる。

以前は、鉗子部の先端にグリッパを取り付けた場合、空気圧シリンダの力はワイヤによって伝えられていた。この場合、ワイヤが二つの関節を経由していたので、関節が動いた際に意図せずにグリッパが動いてしまう場合があった。また、縫合や牽引の際、ワイヤが通っている二つの関節

にワイヤの強い張力がかかり、この張力が鉗子の正確な動きの妨げとなっていた。

これらの問題を解決するために、川嶋研究室は、ワイヤを利用せずにグリッパの開閉を行う方法を考案した。その方法とは、グリッパに小型の空気圧シリンダを配置して、空気配管を鉗子内に通すというものだ(図3)。空気配管と、その内部の空気からは、ワイヤの張力のように関節に影響を与える程の力は生じないので、鉗子先端で誤差0.1mm程度の正確な動作が可能になった。

続いて、腹腔内の映像を術者に伝える内視鏡部について紹介する。内視鏡部は、直径10mmの筒状の形をしていて、筒の中には光源と二つの内視鏡が取り付けられている(図2右)。この二つの内視鏡を用いることによって、腹腔内を

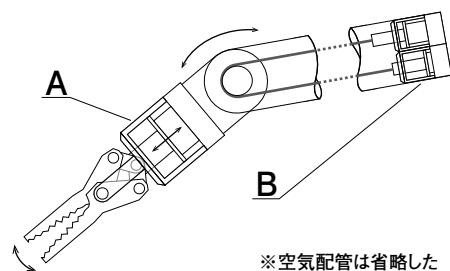


図3 鉗子部の拡大図

マスタ装置

次に、スレーブ装置の位置や姿勢を操作する装置であるマスタ装置について紹介する。マスタ装置には、スティック操作のものやスレーブ装置と同じ形をしたものなど、さまざまな種類がある。これらの中から適切に選択してから、スレーブ装置をより的確に動かせるようなマスタ装置の開発が行われる。

川嶋研究室で開発されたマスタ装置の中で、実際に手術ロボットの鉗子部の操作に使われているマスタ装置の一例を図4に示す。このマスタ装置は、手で軽く掴んで押したり捻ったりと自由に動かせる構造になっている。マスタ装置を操作することで、マスタ装置と同様の動きをスレーブ装置

にさせることができる。また、手で掴んでいる部分に取り付けられている感圧センサによって、グリッパの開閉を行うことができる。こういった構造や機能によって、このマスタ装置は自分の手で直接鉗子を動かしているような、直感的な操作が可能としている。

他にも、内視鏡部の操作に対応した特徴的なマスタ装置の開発も行われている。既存の手術ロボットでは内視鏡の向きや位置を変えるために別途操作が必要なので、内視鏡の位置や向きを直感的に変えることができなかった。

川嶋研究室では、この問題を解決する画期的な装置として、術者の頭部の動きと内視鏡の動きを

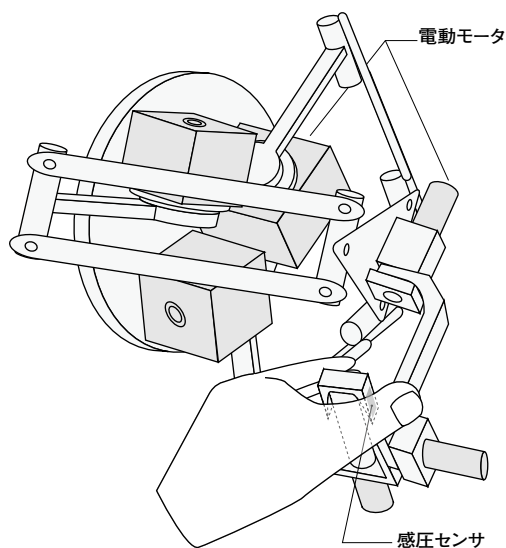


図4 マスタ装置

連動させるシステムを取り入れたヘッドマウントディスプレイの開発を行っている。この装置は、小型ディスプレイを備え、術者の目の前に映像を映し出す頭部装着型の装置である。更に術者が装着している装置の位置や向きに連動して保持部が動き、上下・左右・前後に内視鏡の位置と向きを変えてくれる。結果、術者は患部を自分の目で見ているような感覚を得ることができ、より直感的な手術を行うことが可能になる。

このように川嶋研究室では、スレーブ装置を改良することで正確な動きを実現すると同時に、スレーブ装置を操作するのに適切なマスタ装置の開発も同時に行っている。スレーブ装置・マスタ装置が組み合わさって術者の負担を軽減し、普段の手術の経験を活かすことができる直感的な手術を行うことを可能にしている。



革新的な制御による安全性の向上

手術ロボットは指令信号に対して正確に動くよう作られている。だが、施術部に接触するなどしたために鉗子が外力を受けて動作が乱された場合、術者が目標としていた位置とのずれが生じて正確な動作を行えなくなる。正確な手術を行うためには外力によって生じるずれを考慮する必要がある。そこで、手術ロボットのように正確な動作が求められる機械には、フィードバック制御が用いられる。

フィードバック制御とは、目標とする状態と現在の状態の差をセンサで常に測り、その情報をもとに、目標とする状態に現在の状態が一致するように指令信号に補正をかける制御のことだ。位置や温度などのさまざまな状態がフィードバック制御の対象となる。

既存の腹腔鏡手術ロボットは位置を一致させるフィードバック制御だけが用いられているものが多い。だが、位置という状態だけを補正するのは制御として不十分で、さまざまな問題が生じてしまう。既存の手術ロボットで手術を行う場合、術者は手先の感覚を得られないので微妙な力加減が難しく、通常の腹腔鏡手術での慣れや経験を活かすことができない。最悪の場合、鉗子が臓器に接触していたとしても気付かずに、負荷をかける

ような操作を行ってしまう可能性がある。このような操作を行った場合でも鉗子は操作に忠実に動くため、大きな力が加わり臓器が傷ついて重大な医療事故に発展する危険性がある。

これらの問題を解決するために、川嶋研究室では腹腔鏡手術ロボットに、位置を一致させるフィードバック制御に加えて、力を一致させるフィードバック制御を導入することで、既存の腹腔鏡手術ロボットにはない力覚提示機能を実現した。具体的には、鉗子に加わっている力の情報をコンピュータが受け取り、コンピュータの制御のもとでマスタ装置の電動モータが動いて、機械的に反力を生み出している。この反力がマスタ装置を操作する術者の手に伝わることで力覚提示をしている。

このフィードバック制御を導入することで、接触している体壁側へ鉗子を動かそうとした場合、相応の反力が術者の手にかかり体壁側への操作が行えなくなる。加えて、縫合や牽引の微妙な感覚も得ることができるようになる。つまり、鉗子に加わる力に応じて術者に力覚提示することで手術の安全性を向上させると同時に、まるで自分の手で手術を行っているようなリアルな感覚を再現できるようになる。

当然、位置と力のフィードバック制御を行うた

めには、センサなどを用いて位置と力の情報を得る必要がある。普通はマスタ装置とスレーブ装置それぞれに位置センサと力センサを取り付けるのであるが、力センサには機能する温度に制限がある。鉗子先端は手術のために加熱滅菌をする必要があり、その熱で力センサが故障してしまうので、鉗子先端だけは力センサを取り付けることが容易ではない。

そこで、川嶋研究室は空気の柔軟性を利用することで、力センサを使わずに力の情報を推定する方法を考案した。スレーブ装置は空気圧を動力としているので、鉗子に力が加わったときに複数ある空気圧シリンダ内の空気圧に変化が生じる。この複数の圧力変化の情報をもとに、鉗子にかかる力の情報を推定することができる。この方法によって、既存の電動の手術ロボットで実現できなかった力覚提示を川嶋研究室の手術ロボットは実現することができた。

フィードバック制御の導入によって正確な動作やリアルな感覚が実現できるが、その一方で生じる不都合もある。

不都合の一つに、より精密な操作が可能になったことで、操作ミスや手の震えなどによって生じる不要な操作でさえもスレーブ装置へ正確に伝えられてしまうという問題がある。このような操作

の影響を最小限にするために、指令信号の中で突発的な力や速度の成分をコンピュータで取り除いてから、スレーブ装置に伝える制御を導入している。この制御によってスレーブ装置の動きを滑らかにし、手術ロボットの安全性を向上させている。

他にも、装置間の距離と回線状況から生じる通信遅れの問題が挙げられる。フィードバック制御は状態監視と補正をリアルタイムで行う必要があるので、通信遅れが生じて補正の指令信号が装置に届くまでに装置の状態が変化してしまい適切な制御が行えない。そのために手術ロボットの動作が不安定になってしまうことがある。そこで、川嶋研究室では通信遅れを考慮した制御方法の研究を行い、手術ロボットに導入した。その制御方法とは、各センサからスレーブ装置が安定しているかを判別し、通信遅れが大きいときには電動モータの回転を制御してマスタ装置の操作を重たくすることで、安定性を確保するといったものだ。この制御によって、遠隔操作を安定させて手術ロボットの安全性を高めることに成功している。

このように、川嶋研究室では機械面と制御面の両面から研究開発を行うことで、革新的な手術ロボットの開発を行ってきた。現在は動物実験の段階であり、実用化に向けてさらなる研究開発が行われている。今後の実用化に期待したい。

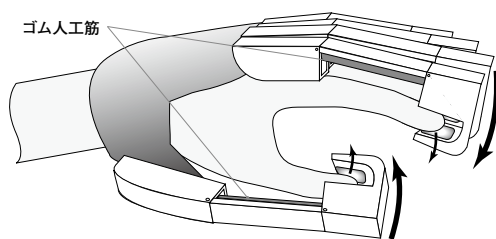


ゴム人工筋を用いた装置の開発

ここまで紹介してきた腹腔鏡手術ロボットには、空気圧を動力とする装置として空気圧シリンダや空気圧モータが用いられていた。一般的に用いられる同様な装置に空気圧ゴム人工筋というものがある。

空気圧ゴム人工筋はゴム管に繊維が編みこまれた構造をしている。繊維を編みこむことで、空気を入れたときにゴム管が径方向に膨らみ、軸方向には縮むようになる。この軸方向に縮む力を利用して、人間の筋肉と同じような働きをさせることができる。

空気の出し入れの量とゴム人工筋から生じる力の対応は、ゴム管が変形するため空気圧シリンダより複雑である。代わりに、ゴム管内にかかる全ての方向の空気圧を利用できるので、空気圧シリンダと比べて約10倍の力を発揮することができ



装着者が指先にかけている圧力に応じてゴム人工筋が縮み、増幅された握力を機械的に生み出している

図5 圧力増幅グローブ

る。また、ゴムや繊維で作られているため非常に軽量で柔らかく、人間の突発的な動きにも強い。そのため、主に介護福祉分野での活用が期待されている。

川嶋研究室でゴム人工筋を用いた装置として開発されたものに圧力増幅グローブがある(図5)。

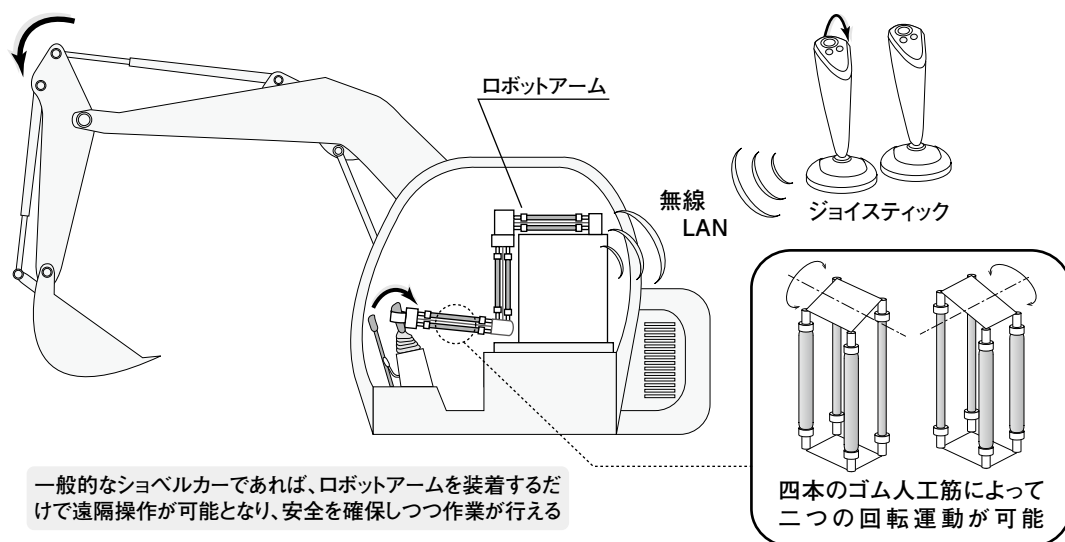


図6 人工筋ロボットアーム

これは物を掴んで運ぶような作業の労力を軽減することを目的として作られた装置だ。各指にゴム人工筋、指先には風船状の袋が取り付けられていて、物を掴むと指先の袋が指で押されて内部圧力が変化する。その圧力変化に応じてゴム人工筋へ入れる空気量を制御することによって、微妙な力加減が可能になっている。このように空気圧を利用することで、水や衝撃などの影響を受けて故障しやすい電氣的なセンサや装置を排し、汎用性の高いパワーアシストを実現している。

他にも、ゴム人工筋をレスキュー分野に応用するために、災害復興を目的としたロボットアームの開発をゼネコンと共同で行っている（図6）。ロボットアームとは、人間の腕の代わりに掴む、離す、運ぶなどの作業を行う機械の腕のことだ。現在、災害時の復興作業は遠隔操作のできる建設機械、あるいは建設機械の遠隔操作を行う空気圧シリンダを用いた装着型のロボットアームによって行われている場合が多い。しかし、これらの一般的な機械は重量が大きく、災害現場まで運搬するのに時間がかかってしまう。

それに対して、川嶋研究室で開発されたロボットアームは、空気圧ゴム人工筋を使っているの、建設機械と一緒に装着する発電機なども含め

ても80kgであり、一般的な装着型ロボットアームに比べて軽量である。ロボットアームの軽量化によって災害現場までの運送時間が短縮され、建設機械への装着も30分程度で行えるようになった。実際の工事現場での実証実験では、直接操作の1.5倍以内という短い時間で同様の作業が行えることが確認されており、性能的にも既存のロボットアームに劣っていない。このロボットアームによって、二次災害の危険性を伴う災害復興作業を作業員の安全を確保しつつ迅速に行うことができる。

最近では、ロボットアーム自体の効率化の研究も行われている。人間が進化の過程で、エネルギー消費に対する動作がより効率的になるように進化してきているという仮定のもと、人間がもつ二関節筋という筋肉に着目した。二関節筋は二つの関節にまたがる筋肉の総称であり、腕がもつ二関節筋としては上腕二頭筋などが挙げられる。人間の腕において通常の一関節筋と二関節筋がどのような比率で使われているかを研究し、ロボットアームに取り入れることで、効率の良い新しいロボットアームの開発を目指している。ロボットアームの効率化が進めば、より軽量で大きな力を発揮できる機械の開発が可能になっていくだろう。

今回の取材で、装置開発の最前線を垣間見させていただきました。大変お忙しい中、度重なる質

問に丁寧にお答えくださった先生方に心より御礼申し上げます。（杉山 暁洋）