

博士論文（要約）

ロボット手術システムにおける
デモンストレーション学習を特徴とする
自律的支援に関する研究

長 隆之

近年、ロボット手術システムは、臨床においてその価値を示しつつあり、世界的に普及する段階にある。現在普及しつつあるロボット手術システムは腹腔鏡下手術を主な対象とする。その基本的な機能は医師による動作入力を精密に再現し、より直感的な動作を実現することである。その一方で、近年のコンピュータの高性能化を背景として、自動車における自動運転など、マシンが自律的に動作することによってヒューマン・エラーを防止し、操作者の負担を軽減するシステムの開発が進んでいる。現在、ロボット・マニピュレータが手術中に自律動作するような機能は臨床現場においては実用化されていないが、自律的な動作による術者支援の実現が期待されている。しかし、ロボット手術における自律的支援の実現には、1)安全性の保証、および2)自律動作によるタスク実行の確実性の向上という二つの課題が存在する。現在のロボット手術における安全性は術者に判断を委ねることによって保証されているが、ヒューマン・エラーを防止するには術者から独立した機構によって安全性を保証する必要がある。加えて、ロボットが自律的に動作する場合にも、システムが自律的に安全性を保証する必要がある。また、タスクの自律実行という点では、既存の技術では、手術環境のような動的環境下においてタスクを人間の術者と同様のレベルで自律実行することは難しい。

本研究は、ヒューマン・エラーを防止し、また術者の負担を軽減することによって、手術の質を高めることを目的とし、ロボット手術システムにおいて、ロボットが自律的に動作することによって術者を補助する機能を開発する。その実現に向け、この研究においては、1)ロボット手術における安全性の保証、2)ロボット・システムによるタスクの自律実行の実現、という2つの課題に取り組む。

安全性を保証するためのアプローチとしては、接触する物体に、その機械的強度を越える負荷がかかることのないシステムの構築を目指す。これは、物体に、その機械的強度を越える負荷をかけなければ、物体に損傷を与えることはないという仮定に基づく。これを実現するための要素技術として、i)接触力が一定値以下となる範囲のみ動きを追従する制御、ii)自律的に状況を検知し、状況に合わせて接触力の上限を切り換えるシステムをそれぞれ構築し、これらを統合する。

タスクの自律実行を実現にむけては、1)軌道の計画、2)力制御の二つの要素について開発を行った。本研究では、結紮における糸の巻き付け動作、切開における切開線を描く動作など、既存の手法では実現が難しいと考えられる動作の実現を目指した。まず、軌道の計画という観点からは、これらの動作は、軌道全体の形状を条件に合わせて計画する必要があり、従来研究の主な焦点であった点から点への動作へ分解することが難しい動作である。また、手術環境下においては、環境がタスクを実行している最中にも変化することが予想され、実時間で軌道を計画、更新する必要がある。本研究においては、これらのタスクの自律実行を実現するため、軌道全体を条件に合わせて実時間で計画することのできる手法を開発した。次に、タスクの自律実行に必要な力制御を開発するに当たり、物体との接触を必要としないタスク、および物体との接触を前提とするタスク

の2つに分類して議論することとした。まず、物体との接触を必要としないタスクにおいて接触力が果たす役割は、予期せぬ接触を認識し、危険性を生じない範囲で動作するための指標であると考えられる。また、物体との接触を前提とするタスクにおいては、適切にタスクを実行するための指標であると考えられる。そこで、前者については、安全を保証するために開発した、接触力が一定値以下となる範囲のみ動きを追従する制御を適用することとし、後者については、タスク中の適切な力のかけ方を計画し自律実行する手法を開発することとする。

以上を踏まえて、i) 接触力が一定値以下に制限される範囲のみ入力動作を追従する制御、ii) 自律的に状況を検知するシステム、iii) 条件が変化する環境下において実時間で軌道を計画する手法、iv) タスク中の適切な力のかけ方を計画し自律実行する手法、という4つの要素技術を開発し、これらを統合する。これにより、マニュアル操作時および自律動作時における安全性を保証し、一部の動作を条件に応じて実行することのできるシステムを構築する。現在普及しつつあるロボット手術システムにおいては、操作者である医師の入力する動作を記録することは容易であり、医師による動作、デモンストレーションからシステムが学習することによって自律的な動作を実現することが効率的な方法であると考えられる。そこで本研究では、デモンストレーションを用いて、医師の動作や判断をロボット・システムが学習する、というアプローチを用いてそれぞれの技術的課題を解決することとした。

まず、安全性を保証することのできるシステムに必要な要素の一つとして、接触力が一定値以下に制限される範囲でのみ入力動作を追従する制御を開発した。この制御を実現するため、本研究では、比例制御とアドミッタンス制御を接触力に応じて切り換える制御を提案する。接触力が設定された上限値以下であれば比例制御により動作入力を実行し、接触力が設定された上限値を超えるものであればアドミッタンス制御により接触力を低減するようにコンプライアンスな動作をする。この制御間の切り換えには飽和関数を用い、これにより制御を切り換える際のチャタリングを抑制することができる。提案する制御系の挙動は解析的に示され、安定した挙動で接触力が制限されることが確認された。また、ロボット手術システムに提案する制御系を実装し、シミュレーションおよび実験によってその挙動を確認した。

次に、安全性を保証することのできるシステムに必要なもう一つの要素として、自律的に状況を検知するシステムを開発した。接触力が安全な範囲にある場合のみ動作入力を追従するシステムにおいては、過度な接触力の制限による操作性の低減を回避するため、接触力の上限は、接触する物体や動作の状況に応じて変化させる必要がある。そこで、自律的に状況を検知するシステムを開発し、その状況に応じて接触力の上限を切り替えるシステムを構築した。このシステムは状況を認識するに当たり、デモンストレーションに基づいて学習を行う。システムは物体と術具の接触時に、接触する物体の機械的特性を推定し、ロボット・マニピュレータの動作の状況を考慮に入れて、接触する物

体と動作の区別を行うことができる。このシステムを用いることで、認識した状況に応じて接触力の上限を切り換えることができることを確認した。

また、タスクの自律実行を実現するために必要な要素技術として、動的環境下において状況に応じて軌道を実時間で軌道を計画することのできる手法を開発した。提案する手法においてはデモンストレーションの軌道を様々な条件下で取得し、デモンストレーションされた軌道の分布をガウス過程分布によってモデル化する。これにより、与えられた条件に対して、軌道を条件付期待値として推定することができる。術前に軌道の分布をモデル化しておくことで、術中に軌道の計算に必要な時間は100ms以下に抑えることができる。実験においては、糸の結紮を模擬した動作などを学習できることを確認した。実験ではタスクを実行する上での条件が動作中に変化する環境下においても、軌道を実時間で計画・更新することによってタスクを実行することが可能であることを示し、システムが安定した挙動で動作することを確認した。

最後に、自律動作に必要な力制御を開発し、前述の軌道計画法と組み合わせて自律動作を行うシステムを構築した。危険が生じない範囲でのみ動作するための制御は、接触力が一定の範囲内でのみ動作を追従する制御によって実現することができると考えられる。そこで、本研究で開発した軌道計画法および接触力が一定以下に制限される範囲でのみ動作を追従する制御を組み合わせることで、障害物が存在する条件下においても、接触力が一定以下になる範囲でのみ自律動作するシステムを構築した。実験において、このシステムは接触力が一定以下の範囲でのみ動作することが確認された。また、適切にタスクを実行するための接触力を計画しロバストに実行するための手法として、開発した軌道計画法を拡張し、デモンストレーションから空間的な動きと接触力の時間変化を同時に学習することで、タスク中の適切な接触力を計画し、それをロバストに追従するシステムを構築した。提案する制御のロバスト性は解析的に確認した。実験では糸を結ぶ動作および切開線を描く動作を模擬した動作を学習し、計画された接触力をロバストに実現できることが示された。

本研究において示した安全性を保証するための手法は、マニュアル操作時にはヒューマン・エラーを防止し、自律動作時にも安全な範囲でのみ動作させるために用いることができる。また、本研究において開発した軌道計画法は、条件に応じて実時間で軌道を計画することを可能にし、動的な環境下での動作実行を実現した。また、この軌道計画法を拡張することで、軌道全体の形状を条件に合わせて適応させる必要のある動作において、空間的な動作のみでなく接触力も適切に計画し、制御することができる。本研究の成果は、マニュアル操作時にはヒューマン・エラーを防止し、また、一部のタスクを安全かつロバストに自律実行するシステムを実用化する上での礎になるものであると考えられる。