

図書遠隔閲覧ロボットシステムの開発

富沢 哲雄（筑波大） 大矢 晃久（筑波大/科技団, さきがけ研究 21） 油田 信一（筑波大）

Development of Book Remote Browsing Robot System

Tetsuo Tomizawa, Akihisa Ohya, Shin'ichi Yuta (University of Tsukuba)

Abstract— This paper describes a system which uses a mobile manipulator as a teleoperated tool for accessing and manipulating remote objects. And also, we intend to extend mobile robot potentials and usage in human daily life. The specific task we set up in this research is to help humans browse books located in a library from a remote location via the Internet. This task was decomposed into three major parts which are, the extraction and return of a book from a bookshelf, its perusal, and the teleoperational interface needed for humans to access to this system via a media such as the Internet. We realized the target task combining the function built and carried out for every operation. And we evaluated its performance through experimental results.

Key Words: Access media, Book remote browsing, Mobile manipulator

1. はじめに

現在移動ロボットに関する研究は広く行われていて、自律的な屋内ナビゲーションやマニピュレータのコントロールといった各要素の能力は、ここ数年で格段に高性能化が進んでいる。しかし、日常の生活空間を見渡しても依然としてロボットが活躍している姿を見ることはあまりなく、実用化されているのはごく少数に限られている¹⁾²⁾。一方で世の中では離れた場所で物理的な相互作用を働きかける要求は非常に多く、これが実現すれば日常生活の中でのロボットの応用範囲が飛躍的に広がると考えられる。

一方、近年一般家庭にもコンピュータやインターネットが広く普及し、そのネットワークを介して、様々なデータベースの情報にアクセスできるようになった。しかし、あらゆる物や事柄をデータベース化することは不可能であり、また、時間経過に伴う対象物の変化により記録データと実物との間に相違が生じてくる。このような対象を、リアルタイムに直接アクセスし、実物を観察し触れてみる事ができれば、計算機上のコンテンツと実世界に存在する物体をシームレスに融合することが可能となり、情報世界の扱う対象が飛躍的に拡大すると考えられる。この現実のためには、検索要求があるごとに実世界に存在して時間的に変化する対象にアクセスするエージェントが必要となる。このエージェントは、実世界を移動し、対象物を自ら見つける機能を持たねばならない。そのためには、近年著しく進歩している自律ロボットや遠隔操作の技術を応用可能である³⁾。

そこで本研究では、自律移動マニピュレータを介して遠隔地の物体へアクセスするシステムを構築し、日常の生活環境におけるロボットの可能性を示す。具体的なタスクは、ロボットを介して遠隔地の本を閲覧することとした。Fig.1 に図書遠隔閲覧のイメージ図を示す。このシステムを使用する環境としては、ユーザーが図書館に直接出向かずに、遠隔の図書館内に配置されているロボットを自分の代理身体として本を閲

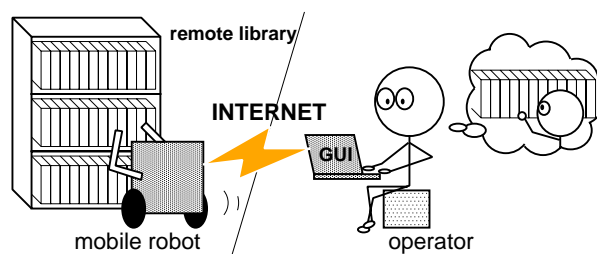


Fig.1 Concept of remote book browsing system using a mobile robot.

覧することを想定している。したがって、ユーザーはあたかも自分自身が実際に図書館に向いている感覚で好みの本を手にとって中身を見て目的の情報を探し出すことができる。

近年は多くの本が電子化されており、電子図書館も構築されつつある。本の電子化は本の中の情報の重要性に焦点をしばっているが、本は著作物・文化物として、その物理的な存在も重要な意味を持っている。また、すべての本を電子化することは非常に難しく、近い将来に本の存在がなくなるとは想像しにくいいため、本研究で構築しようとするシステムの存在意義は確実に存在する。また、このようなシステムが実現されれば、古文書を電子化する作業の自動化などにも応用できると考えられる。

2. 基本方針と関連研究

図書館を対象として働くロボットは、J.SuthakornらのCAPMプロジェクト⁴⁾で研究されている。このプロジェクトでは、ロボットが動作しやすいよう特別に整備された環境を対象としている。具体的には、それぞれの本は形状の決まった専用ケースに収納され、隣の本の間にはスペースを設けて規則正しく置かれていなければならない。また、このシステムでは、移動口

ボットの仕事は本を取り出すのみで、本を開いてページをめくるのは別の装置で行うこととしている。

これに対し、我々の研究は人間が共存する普通の図書館の環境を対象とした。一般的な図書館は、本の位置や姿勢は厳密に決められておらず、誰かが本を閲覧する度に、本の配置が少しずつ変化する。したがって、動的に変化する環境においても適宜環境を認識して動作する必要がある。また、本の取り出しから閲覧までのすべての動作を1台の移動ロボットで実現させることも上記のプロジェクトとの相違点である。各機能を1つのロボットにまとめることで、外部の閲覧装置まで移動する手間を省くことができる。閲覧操作の待ち時間を短くすることは、使用者の使い心地に大きく影響する重要な要素である。

このタスクを実行するためのロボットには、自律的な走行、センサによる本の認識、アクチュエータによる本の取り出し・返却、ページめくり、本の画像の提示、遠隔地との通信など、多岐に渡る機能が要求される。我々はこれまでに、本の高さ・姿勢・大きさなどに細かい制限を設けた上で、プロトタイプを製作した⁵⁾。プロトタイプでは、小型の移動ロボットに1自由度のマニピュレータとハンドを持たせ、人間が与えた指示に従って遠隔地に置かれた任意の本の取り出す動作と返却する動作に加えて、本を開いて画像を送信するという最低限の動作を実現した。そこで次の段階として、より実際の図書館に近い環境で働くことができるようなロボットシステムを新たに構成した。

我々は、遠隔図書閲覧動作を以下の3つのキーの組み合わせと考え、これらのキーを実現して統合することにより、タスクの実現を図った。

- 本の取り出し・返却動作
- 閲覧動作
- 遠隔操作

以下、それぞれの要素について、3章では任意の位置・姿勢・大きさの本をハンドリングするために構築した機構と、本へのアプローチ方法、4章では本を開いてページをめくる閲覧動作、5章ではユーザとロボットとの遠隔操作インターフェースの構成について述べる。そして、6章以降では統合システムによる動作実験とその評価について述べる。

3. 本の取り出し・返却

3.1 マニピュレータ

手先を環境中の任意の位置姿勢に運ぶためには、最低6つの自由度が必要である。ここでは、我々の研究室で開発した7自由度のマニピュレータを使用することとした。このマニピュレータは全長が約1000mmある。このマニピュレータを自律移動ロボットに装着すると、手先を400mmから1100mmまでの任意の高さに運ぶことができる (Fig.2)。

マニピュレータの先端には、本を掴むために設計したハンドを取り付けた。ハンドは左右対称にスライドする2枚の板から成るグリッパより構成した。設計の

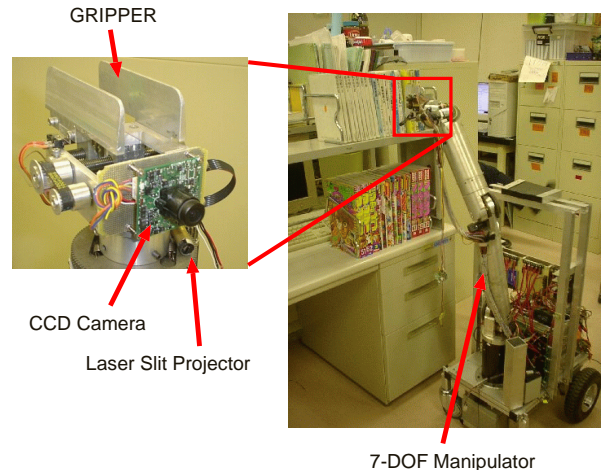


Fig.2 7 DOF manipulator and hand for the book picking.

際に設定した本の仕様は、厚さ 50mm 以内・重量 400g 以下とした。

3.2 本の形状認識

本の位置を計測するシステムとしてはレーザー距離センサを採用した。このセンサは、レーザー投光器から赤外線スリット光を照射し反射光を CCD カメラでとらえる構造になっており、光切断法により反射点の3次元空間の座標を計算する。本棚に向かってレーザー光を照射すると、本が存在する場所から反射光が返ってくるので、それぞれの本の位置や幅を測定することができる。また、反射が返ってこない場所は、本が置かれていない空間として認識する。1回の測定をするのに要する時間は約100msecである。ここでは、本は垂直に立っていると仮定している。傾いた本の検出は今後の課題である。

3.3 本の取り出し・返却動作

本を取り出す手順は以下の通りである。まず、本棚の前に到着したロボットは、本棚の方に手先を向けて本棚の映像を撮影する。その際に、レーザー距離センサによって本の位置や境界を見つける。希望する本をユーザに問い合わせた後、目標の本の正面に手先を移動して、グリッパを本の幅に合わせて開く。そして、本の隙間にグリッパを挿入して本をつかんで引き抜く。

本を返却する場合の手順は以下の通りである。手に持っている本があった場所に、本が挿入できる十分な幅があれば、取り出しのときと逆の動作を行い、元の位置に返却する。また、近隣の本により本来返却すべき空間が塞がれている場合は、本棚の周辺領域を探して適当な場所が発見できればそこに返却する。

目標とする本の両側にグリッパを差し込むには、2mm以内の精度で手先をコントロールしなければならない。レーザーセンサによる本の境界位置の計測精度は約1mmであるため、マニピュレータは1mm以内の精度でコントロールできればよい。なお、本棚の詰まり

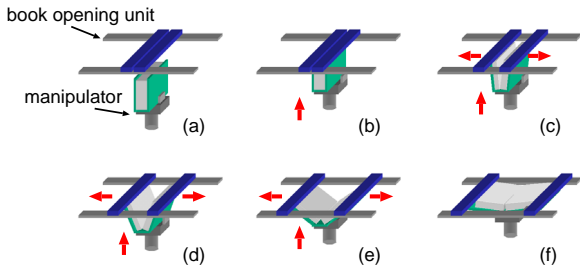


Fig.3 Structure of book opening/closing device.

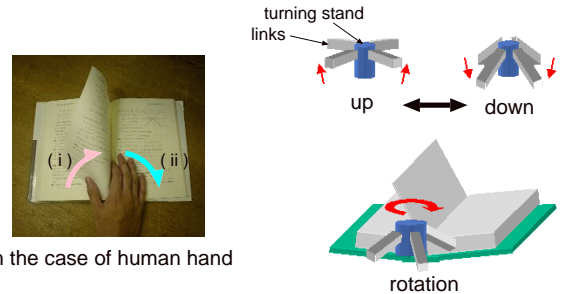


Fig.4 Structure of page turning device.

具合に関しては、最低限グリッパの厚み分のゆとりが必要である。

4. 閲覧動作

閲覧に必要な機能は「本を開いてページをめくること」「映像を撮影してユーザーに提示すること」である。本棚から取り出された本は、マニピュレータに取り付けられたハンドによって把持されている。ロボットには腕は1本しかないため、本を開いたりページをめくするには、マニピュレータの他に何らかの機構を追加する必要がある。

本のページをめくる手法に関しては、いくつか商品化されている例はある⁷⁾。しかし、これらは初めに人間が本を開いて正しく配置する必要がある上、装置が大型であるため、ロボットが自動的に本を扱うという目的には適していない。そこで我々は、できるだけ小型で単純な構造で、1枚ずつページをめくることができるよう、本の開閉・ページめくりのそれぞれについて独立した装置を開発してロボットに搭載した。

なお、本システムを設計するにあたり、対象とする本は大きさがB5からA4サイズで、ハードカバーのものとした。

4.1 本の開閉方法

本開閉装置の動作の概要を Fig.3 に示す。この装置は、平行に並んだ2本のレールの間に2本の橋をかけた構造から成る。これらの橋はモータにより左右対称に平行移動する。

本の開閉動作の手順は、まずマニピュレータで本のエッジを2本の橋の中央に押し当てる (Fig.3 a~b)。次に、ハンドの手先を徐々に押し上げながら、橋を左右対称に開く (Fig.3 c~f)。なお、本を開くときはこの逆の手順を行えばよい。2本の橋を開く距離や速さは本のサイズによって異なるが、本が開閉装置に挿入されたときのマニピュレータの手先位置により本のサイズを知ることができる。また、この方法では本の面が同じ高さまで上昇してくるため、次の節で説明するページめくり装置を、開閉装置の上部に固定しておくことができ、本が開いた後に改めてセットする必要はない。

4.2 ページをめくる方法

開いた本のページをめくるための動作は、人間が片手でページをめくるときの指先の動きを模擬する機構を考案することで実現をはかった。人間の場合、まず親指を紙面に押しつけながら、指の付け根を中心とした円弧に沿って紙面をなでて紙をずらす (Fig.4 左 (i) の軌道)。そして浮き上がった紙を先に送りながら (Fig.4 左 (ii) の軌道)、次に開くべきページの中に手を入れて押さえるという動作を行うのが一般的である。

この動きを再現するために、人間の指の役割をする4本のフリーリンクと、それらを回転させる回転台から構成されるページめくり装置を考案した。リンクの先端には摩擦面が取り付けられており、リンクを上下させることで、一定の力で紙に摩擦面を押しつけた状態と、紙面から離れた状態とを切り替える (Fig.4 右図)。ページをめくるときは、左右のページにリンク先端を押しあてた状態で全体を回転させることで、摩擦面が本の表面の凹凸に沿って移動し、それに伴いページがずれて浮きあがる。紙が浮き上がったら、リンクを上方へ持ち上げながら回転を続けると浮き上がったページが先に送られる。同時に、次のページの上には隣のリンクが挿入されるため、めくっている紙が元に戻ろうとした場合でも逆流を阻止することができる。

回転台が180度回転するとページが1枚めくられ、その後リンクを再び紙面に押しあててページを固定する。この動作を目的のページに到達するまで繰り返す。また、この機構は回転台の回転方向とリンクを上下するタイミングを左右反転させるだけで、反対向きにもめくることができる。

4.3 ページ映像の取得

映像の撮影は高精細な画像の得られるデジタルカメラを用いて行う。カメラはロボットに搭載されたPCによって撮影・画像ダウンロードが制御され、映像は無線LANを介して遠隔地の操縦者に送られる。このシステムで採用したカメラは1800×1200pixelの分解能を持っており、教科書サイズの本を撮影した場合には144dpi相当の解像度の画像が取得できる。

Fig.5に様々な大きさの文字の画像を取得した例を示す。10ポイントのサイズの文字の場合、1文字あたり20×20pixelの画素数となるため、文字を判読するのに十分な解像度であることがわかる。また、映像送信に

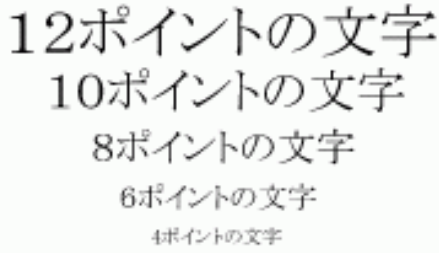


Fig.5 Resolution of the captured picture.

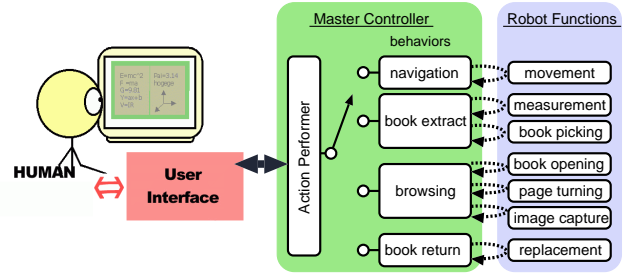


Fig.6 Software Structure for integrated system.

は 4 ~ 8 秒の時間を要する。

5. 遠隔操作

5.1 コントローラ

ロボットシステムを制御するソフトウェアは、Robot functions、Master Controller、User Interface という 3 つのレイヤから構成した (図 6)。

Robot Functions は最下層に位置するレイヤであり、センサの信号処理やモータの制御といった低レベルの作業を行っている。これらのファンクションは、上位の意思決定層である Master Controller の指示に従って実行される。これまで個別に開発してきた形状認識センサやアクチュエータの制御プロセスは、それぞれを一つのファンクションとして、このレイヤに実装した。

Master Controller は、ロボットに搭載したノート PC 上の総括制御プロセスである。ここでは、行動決定と操作シーケンス生成が行われる。Action Planner はロボットの状況に応じて、ロボットが実行可能な行動を人間に提供し、人間の選択したコマンドから次の行動を決定する。行動が決まったらそれぞれの振る舞いに応じて操作シーケンスを生成し、下位レイヤに指示を出す。User Interface は、ロボットから発信される情報を人間に提示し、また人間からのリクエストをロボットに伝える役割を持つ。ユーザの PC の画面内に映っている物体またはボタンをクリックして選択することで、人間はロボットに自分の意思を伝える。

5.2 遠隔操作インターフェース

ロボットを操作するためのインターフェースとして、PC の画面内に映っている物体またはボタンを選択するだけで、すべての動作を指示できる GUI を作成した。ユーザーインターフェースの概略図を Fig.7 に示す。GUI の画面は、ロボットのカメラで撮影した映像を表示するメインウィンドウと、ロボットに対して指示を送るためのコマンドウィンドウから構成した。また、画面に必要な情報だけを効果的に表示するために、遠隔の本を読むための動作全体を、本棚までの移動、本の選択、閲覧の 3 つの部分に大別し、GUI にはそれぞれに応じたモードを用意した。ロボットの状態やオペレータの操作によって、以下の 3 つのモードが切り替えられる。

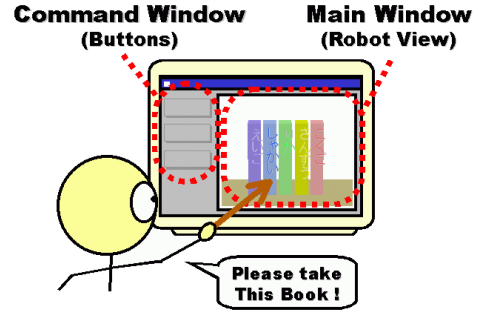


Fig.7 An overview of GUI.

5.2.1 ナビゲーションモード

ロボットには図書館の地図と、本のカテゴリリストが与えておく。ユーザが自分の読みたい本のカテゴリをリストから選ぶと、ロボットは自律的に経路を生成し、障害物を避けながら目標の本棚位置に移動する。

5.2.2 本選択モード

本棚の前に到着したロボットは、本棚の映像を撮影すると同時に、レンジセンサによって本の位置や境界を検出する。画像中で発見された本には、それぞれに境界線を引いてエリアを区切る。さらに、ユーザは読みたい本を画面上でクリックして指示する。コマンドウィンドウにはカメラを移動して視野範囲を変更するためのボタンを配置した。

5.2.3 閲覧モード

閲覧モードでは、メインウィンドウには開いているページの映像を表示する。コマンドウィンドウ中のページめくりボタンを押すとページめくり装置が紙を 1 枚めくった後、新しいページの画像が取得される。

6. 統合システム

これまでに述べた構成要素を 1 台の移動ロボット上に統合して、実験システムを構築した。本研究では、移動ロボットのプラットフォームとして、我々の研究室で開発された山彦シリーズを使用した。目標の走行軌跡を与えられると、その線に沿って走行するという機能が標準で装備されている⁸⁾。山彦は独立二輪操舵の移動ロボットで、本体の大きさは 45cm(W)×55cm(D)×80cm(H) である。この山彦を移動用の台車として、本をつかむた

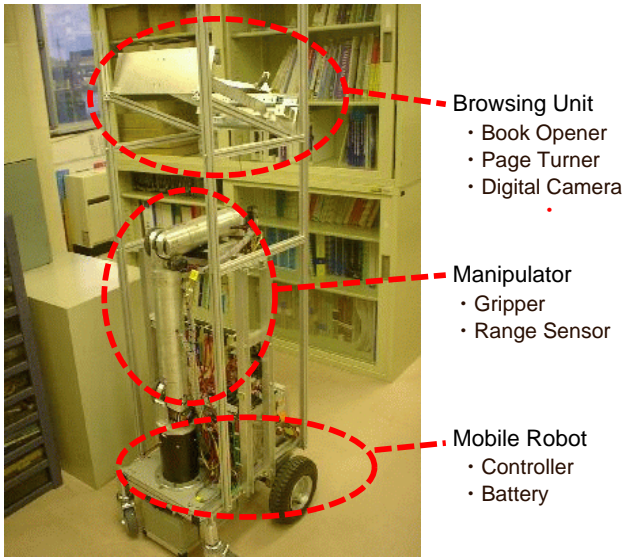


Fig.8 Integrated book browsing robot

めのマニピュレータと閲覧装置を取り付けた。構築したロボットの全容を Fig.8 に示す。

本ロボットのシステムアーキテクチャを Fig.9 に示す。山彦は各機能ごとに CPU(Transputer:T805) が載ったモジュールボードを持っている。ノート PC 上の総括制御プロセスは、走行制御モジュールや画像処理モジュールと情報を交換してロボットの行動を制御している。また遠隔地の人間とコミュニケーションを取るために、PC の PCMCIA のスロットにはワイヤレス LAN カードを挿しネットワークに接続した。

7. システムの動作実験

構築したシステムを利用して、離れた場所に置かれた任意の本を閲覧する実験を行った。実験を行った環境は、オペレータとロボットは同じ部屋の中に配置し、オペレータから直接見ることのできない位置に本棚を置いた。実験の流れは以下の通りであり、その際のインターフェースとロボットの振る舞いの様子を Fig.10 に示す。

1. オペレータは自分の PC からネットワークを介してロボットにアクセスし、まず初めに目的とする本のカテゴリを指示する。
2. ロボットが本棚に到着すると本の選択モードに移行して、本棚にラベルを付加した映像がユーザーに提示される。
3. ユーザーがその中から本を選択すると、ロボットは手を伸ばし本を取り出す。
4. 取り出された本は閲覧装置に収納され、ページの映像がユーザーに提示される。

この実験では、オペレータはカテゴリの選択と本の選択というわずか 2 回の指示で、本にアクセスして情報を入手することができた。システム全体のパフォーマンスは、ナビゲーションの移動の速さは 30cm/s、本

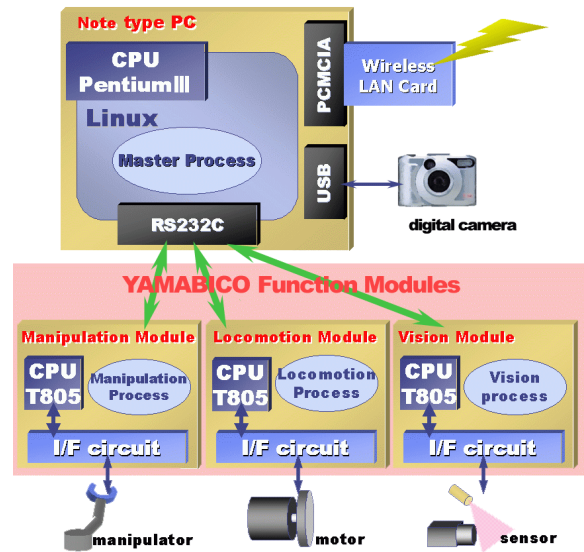


Fig.9 Controller architecture of the robot.

の取り出して閲覧装置まで運ぶ動作には 20 秒、本を開いて開いてページの映像をユーザに提示するには 10 秒程度の時間を要する。また、ページを 1 枚めくる時間は 4 秒である。

次に、各動作の確実性について評価する。本の認識に関しては、ほとんどの場合において正確な識別ができる。ただし、太陽や照明の光が直接映り込む環境では本の境界を見落とす場合もあった。本を取り出す動作の成功率は 8 割程度である。主な失敗の原因は、手先位置にずれが生じて本を押し込んでしまうことであった。しかし、いずれの場合もユーザーによる再履行の指示により本を把持することができた。本の開閉動作の成功率は 7 割程度である。これは本がたわんだり、手先のわずかな振動により開閉装置から本が逸脱してしまうためであった。この部分は今後改良の余地がある。ページめくり動作は、稀に一度に数ページめくってしまうこともあるが、おおむね良好に紙をおくることができる。

8. まとめ

本研究では、ロボットを遠隔地にある実物へのアクセスメディアとして使用する一例として、ロボットを介して離れた場所に置かれた本を閲覧することのできるシステムを実現することを目的としている。本稿では、ロボットを介して遠隔地の本を閲覧することを考え、これまで構築したシステムの構成要素と統合システムによる実験について報告した。

閲覧動作の操作性と信頼性を向上させるために、今後取り組むべき課題として以下の項目が挙げられる。

- マニピュレータのキャリブレーション
- 傾いた本の姿勢認識
- 本の返却スペースの確保
- ページめくり装置自身の影による不可視領域の画像補間

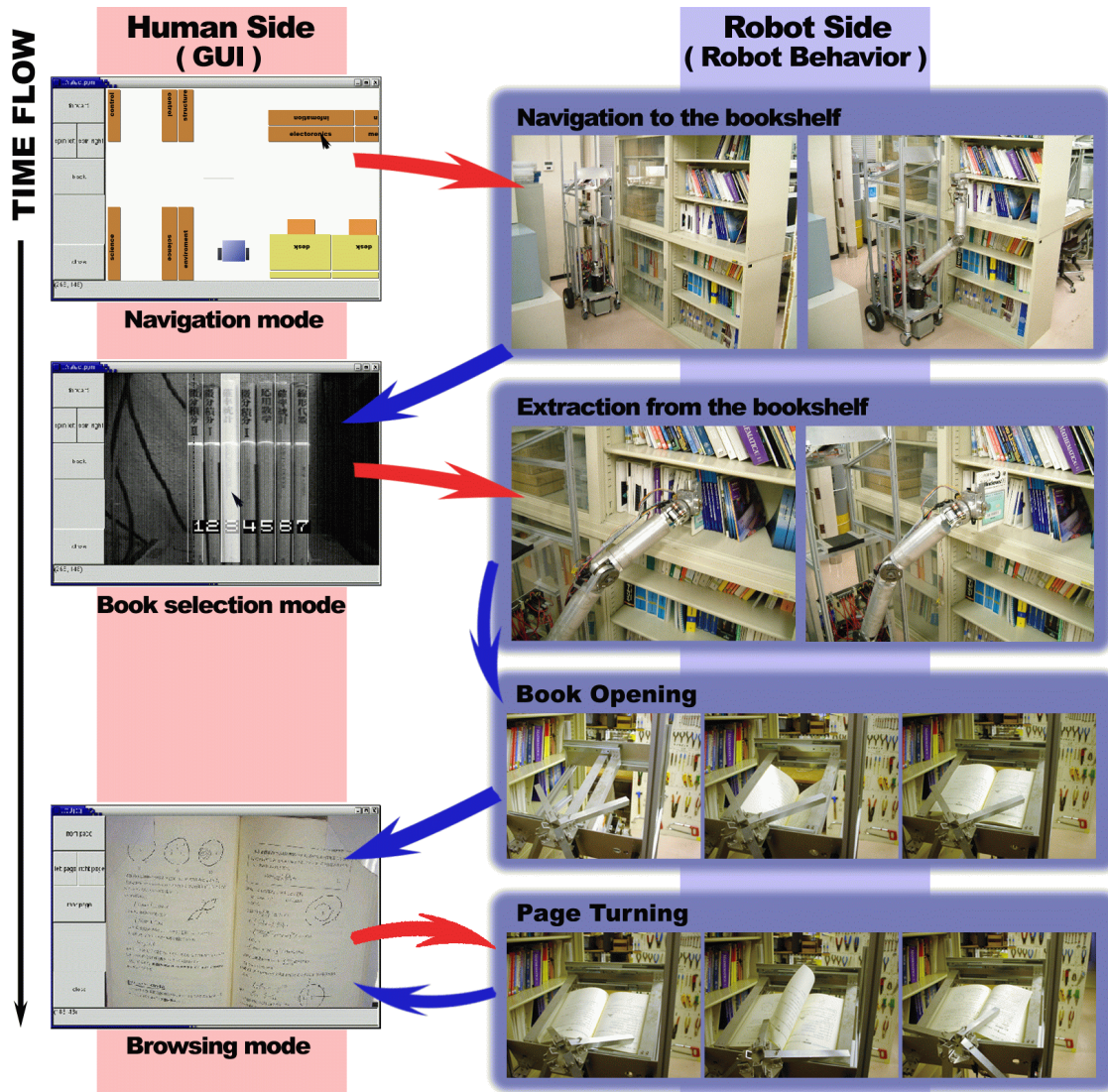


Fig.10 Scenes of an experiment using the all-in-one integrated robot system.

- 図書館内の長距離・長時間ナビゲーション
- 失敗の検出とリカバリーの実現

これらについて検討・改良を施し、実際の図書館にロボットを配置してフィールドテストを試みたいと考えている。

参考文献

- 1) E.Stroulia, M.Strobel : "Office Waste Cleanup : An Application for Service Robots", Proceedings of ICRA'97, pp.1863-1868.
- 2) J.M.Evans : "Help Mate : An autonomous mobile robot courier for hospital", Proceedings of IROS'98, pp.1695-1700.
- 3) S.Maeyama, S.Yuta, A.Harada : "Remote Viewing on the Web using Multiple Mobile Robotic Avatars", Proceedings of IROS'01, pp.637-642.
- 4) J.Suthakorn, S.Lee, Y.Zhou, T.Thomas, S.Choudhury, G.S.Chirikjian : "A Robotic Library System for an Off-Site Shelving Facility", Proceedings of ICRA'01, pp.3589-3594.
- 5) T.Tomizawa, A.Ohya, S.Yuta : "Book Browsing System using an Autonomous Mobile Robot Teleoperated vir the Internet", Proceedings of IROS'02, pp.1284-1289.
- 6) S.Yuta, S.Suzuki, Y.Saito, S.Iida : "Implementation of an Active Optical Range Sensor Using Laser Slit for In-Door Intelligent Mobile Robot", Proceedings of IROS'91.
- 7) http://www.j-d.co.jp/4_fks/readable/r_top.html
- 8) 小倉 知樹, 油田 信一 : "自律移動ロボットにおける地図データ・プランニング機能のモジュール化", 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, vol.1, pp.239-240.