高速書籍電子化のための高速書籍自動めくり機

溜井 美帆* 山田 雅宏* 渡辺 義浩* 石川 正俊*

Automatic Page Turner Machine for High-speed Book Digitization

Miho Tamei*, Masahiro Yamada*, Yoshihiro Watanabe* and Masatoshi Ishikawa*

In recent years, there has been an increasing demand to digitize a huge number of books. A promising new approach for meeting this demand, called Book Flipping Scanning, has been proposed. This is a new style of scanning in which all pages of a book are captured while a user continuously flips through the pages without stopping at each page. Although this new technology has had a tremendous impact in the field of book digitization, page turning is still done manually, which acts as a bottleneck in the development of high-speed book digitization. Against this background, this paper proposes a newly designed high-speed, high-precision book page turner machine. Our machine turns the pages in a contactless manner by utilizing the elastic force of the paper and an air blast. This design enables high-speed performance that is ten times faster than conventional approaches and, in addition, causes no obstruction in the digitization process. This paper reports the evaluation of the proposed machine using various types of paper with different qualities. Our machine achieved high success rate when turning pages at around 300 pages/min, showing that it is a promising technology for turning pages at high-speed and with high precision.

Key Words: Page Turner Machine, Book Digitization, Digital Archive

1. はじめに

タブレット PC やスマートフォンをはじめとする小型情報端末の普及や、大規模な情報のデジタルアーカイブとその共有に伴って生じる様々なサービスが整備される中、書籍がメディアコンテンツとして注目を集めている。このような背景のもと、従来の紙書籍を電子化するニーズが全世界で急速に高まっている。具体的には、図書館などの専門的な機関に留まらず、企業の紙文書や一般ユーザのノートなど様々な局面でのニーズがあると考えられ、その導入場所や使用形態は多様性が高い。さらに、天災などの被害によって書籍が失われるリスクを回避するために電子化を進める重要性も高まっている。書籍を破壊することなく、なおかつ高速かつ自動に電子化を達成する書籍電子化技術は、このような背景の下で、ビジネスから日常まであらゆる局面で影響を与える強力な技術である。しかし書籍を高速かつ手軽に電子化するための技術力は十分ではない。

これに対して、膨大な書籍の電子化を促す重要な技術として、Book Flipping Scanning が提案された [1]。これはユーザのめくり動作中に、紙面の動きを止めることなく連続的に書籍情報

を取り込む新たな構想である。このような構想を実現するためのシステムとして、基本システム [1]、高速・高精細を両立するシステム [2]、多眼システム [3]、ハンドヘルドタイプ [4] など様々なシステム形態が提案・実証されている。

一方、これまでのシステムでは、書籍のページめくりは人間によって手で行われていた。この場合、めくり速度にばらつきが出る、複数ページを重ねてめくってしまう（重送）などの問題がある。また、電子化する書籍の量が多くなると、人によるめくり作業は現実的ではない。このように手動では高速かつ正確な書籍のめくり動作を継続して行うことが困難であり、書籍の自動めくり機が必要であると考えられる。

Fig. 1 Automatic page turner machine

原 2012 年 12 月 10 日

* 東京大学情報理工学系研究科

* Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

■ 本論文は有用性で評価されました。

■ J-STAGE では本論文の電子付録として動画が閲覧できます。

そこで本論文では、高速な書籍電子化の実現に向けて、高速・正確・自動の3条件を満たす新たな書籍のページめくり機を提案する。本装置は、これまでのページめくり機の要求を大幅に超える高速性を実現するものである。また、書籍電子化に特化するために、書籍紙面の上を覆わないタイプの、従来とは異なる新しい構成での設計を導入している。この設計の下、**Fig. 1**に示す試作機を開発した。本機を用いた実験の結果、高いめくり性能を実現しており、高速書籍電子化の新たな発展に寄与することが期待される技術であると言える。

2. 紙のハンドリング技術と本システムの要求仕様

2.1 従来技術

これまでに、紙葉のハンドリング機構として様々なものが提案されている。しかし高速化を達成する多くの機構は、綴じられていない紙葉をさばくことを目的としており、書籍をターゲットとはしていなかった[5]~[8]。

書籍をターゲットとする機構としては、福祉の観点から書籍のページを自動的にめくる機械が実用化されているが、読書を目的としており、高速なめくり動作を実施するものではなかった[9]。

また、機構に着目した場合、紙葉のハンドリング機構の多くは、その対象に依らず、ローラを紙面に接触させて回転させることで搬送・めくりを実現するものが主流である[10]~[13]。これらはローラが書籍の紙面上に現れ、紙面を遮る点で、本論文で着目する書籍電子化のタスクには向いていないと考えられる。

このほか、ローラを用いない構造に基づいた、書籍電子化を自動化するための自動めくり機構もいくつか報告されている。例えば、指を模した棒でページの端をめくりながら、次ページとの隙間を作る機構[14]や、吸引機能などを搭載したコンピュータによって、ページをハンドリングする機構が導入されている[15][16]。これらはページを接触把持してめくる機構を採用しているため、20~50 [pages/min] 程度のめくり速度であり、高速化には限界があると考えられる。

2.2 高速書籍自動めくり機における要求仕様

高速書籍電子化を達成するためには、自動めくり機は以下の三つの要求を満たしている必要がある。前節でまとめたように、従来技術ではこれら三つのすべての要求を満たすことができていなかった。

高速性 Book Flipping Scanning で目標とされている速度は、300 [pages/min] 以上である。この性能はセンシング機能のサイドでは、実現可能であることが実証されているが、自動めくり機としてはこれまでよりも大幅な性能向上を要求するものである。具体的には、従来達成されている速度の10倍程度に相当する。

正確性 書籍の電子化においては、書籍全体の中で1ページでも取り込みが抜けてしまうと、書籍として意味をなさない。そのため、ページの搬送において複数枚が同時にめくれる重送や、搬送の際にページの形状が著しく崩れている場合など、撮像に対し不適切なめくり方では要求を満たせない。そのため、1冊全体を最初から最後まで安定的にめくるこ

とが必要となる。

非接触・非遮蔽性 書籍電子化のためには、書籍以外のものがカメラに映り込まないようにする必要があるため、紙面上を物体が遮る機構は望ましくない。そこで、書籍と撮像系の間は何も遮蔽物のない空間とし、加えてページの搬送も非接触に行う必要がある。

このように、高速書籍電子化のための自動めくり機は、これまでの技術とは大きく異なる構成である必要があると考えられる。

3. 高速書籍自動めくり機

3.1 基本原理

本装置は、紙葉が湾曲した状態から元に戻ろうとする弾性力と送風を利用して、1ページずつ非接触に書籍をめくる構成を基本原理とする。

本装置では、書籍全体を湾曲させた際に、各ページのずれによって綴じ部の対辺側に生成される平面（以下、端面と呼ぶ）をめくり操作に利用する。**Fig. 2**に示されるように、端面では各ページが局所的な範囲では等間隔にずれながら重なり、紙端が平行に並んでいることが分かる。このことから、端面を押さえながら、その押さえを端面に沿って移動させることで、ページが1枚ずつ解放され、湾曲によって生じた弾性力によって起き上がると考えられる。

提案する装置では、押さえから解放されたページが浮き上がり、次ページとの隙間が生成されると、弾性力と送風によってページ全体が搬送される機構を採用している。なお、本論文では押さえに相当する部分をめくりヘッドと呼ぶ。このように本装置は、人間が書籍をめくる際の操作を、機械によって高精度に行おうとするものである。本装置で実施される工程は次の三つに分解することができる。

- (1) 端面上を押さえるめくりヘッドが移動
- (2) 最上ページのみを解放
- (3) 最上ページを反対側に搬送

この3工程において、(3)が完了する前に(2)が実施されないように機構を設計すれば、原理上重送なく1枚ずつめくることができると考えられる。具体的には、ヘッドの先が次ページの紙端に到達するまでに、最上ページが搬送されなければならない。ここで紙の搬送とは、紙が起き上がってから反対側に倒れるまでを指し、この間に同紙の両面のページがカメラによって撮像されることを意味する。この条件に従った動作の様子を**Fig. 3**に示す。同図は本の綴じ部方向から撮影した写真である。各写真の右側には前述のめくりヘッドに相当する機構がある。図に示されるように、めくりヘッド (head of manipulator) は1ページずつ最上ページのみを解放するとともに、同ページが反

Fig. 2 Enlarged view of the side surface of a book

Fig. 3 Slow motion image sequence showing the page turning in our system. We can see that the top page is free after the released page is turned to the opposite side

Fig. 4 Motion of the turner head

対側に搬送されるまで次のページを解放しないように動作していることが確認できる。

上述の条件に基づくと、ヘッドの移動速度 v [$\mu\text{m/s}$] は、ページの搬送に要する時間を t [s] とすると、下式を満たす必要がある。

$$t < \frac{l}{v} \quad (1)$$

上式で l [μm] は **Fig. 4** に示されるめくりヘッドの移動方向に対するページ間の距離である。以降の説明を補足するためのめくりヘッドの移動に関する模式図を **Fig. 4** に示す。なお、3.4.1 項で詳述するが、めくりヘッドはつまめ (toe) とホルダー (holder) で構成される。

さらに、ページめくり動作の目標速度 P [pages/min] を達成するためには、下式を満たす必要がある。なお、下式では時間の単位を秒に合わせて立式している。

$$\frac{lP}{v} < 60 \quad (2)$$

以上の式 (1)、および式 (2) より、速度 v [$\mu\text{m/s}$] の条件は下式となる。

$$\frac{lP}{60} < v < \frac{l}{t} \quad (3)$$

ここで、高速カメラで撮影した予備実験により、紙の搬送に要する時間 t [s] は 0.14 [s] 程度であることを確認した。ゆえに、例えば紙厚が 100 [μm] である書籍の場合は、端面とページとのなす角度 θ ($= \arcsin(m/l)$, ここで m は紙厚を表す) を 30° とすると $l = 200$ [μm] となり、目標速度 $P = 300$ [pages/min] を達成するためには、ヘッドの送り速度を 1,000~1,400 [$\mu\text{m/s}$] 程度とすることが適切であると考えられる。この条件を基本として、次節からは具体的に試作した装置の詳細を述べる。

Fig. 5 Configuration of the designed high-speed page turner

3.2 装置の全体構成

Fig. 5 に提案する高速自動めくり機の構成を示す。本装置は大きく分けて、書籍固定部 (book mounting part), ページめくりアーム部 (page turner manipulator), 送風部 (blast), ページ押さえ部 (retainer for turned pages) の四つの機構から成る。また、ページめくりアーム部 (page turner manipulator) はめくりヘッドと端面押し付け・搬送部 (arm parts of the manipulator) から成る。図に示されるように、書籍固定部は回転する。ページめくりアーム部も回転と上下左右に移動する機構を備えている。本装置は、非接触かつ高速かつ計測範囲を遮蔽しない構造が達成されており、2.2 節で述べた要求仕様を満たしている。

また、対象とする書籍は、文庫本~A4 判の大きさ、厚さ 50 [mm] まで、坪量 50~150 [g/m^2], 紙厚 50~150 [μm] で、端面が均一に揃うことを条件とする。なお、これまでに提案されている Book Flipping Scanning のセンシング技術に基づく、 90° 以上の開きで各ページがめくられれば、めくり機との連携をとることなく、自動で電子化できることが実証されている。そこで、本装置では同条件を達成できる精度でめくることが目的とする。加えて、本試作では右ページの端面にページめくりのためのヘッドを設置して、左側にめくる構成とした。

各機構部ごとの詳細を次節以降で述べる。

3.3 書籍固定部

書籍全体の固定には書籍綴じ部を利用する。具体的には、背表紙を下に向け、書籍の綴じ部を両側から挟んで固定する。綴じ部を固定する機構の構造を **Fig. 6** に示す。図に示されるように軸 1 (1st axis) を回転させることで、軸 2 (2nd axis) が回転する。軸 2 は、綴じ部を挟む部分 (clamp) の両側で異なる巻

Fig. 6 Configuration of book clamp

Fig. 7 Holding of the book page curvature

き方向で切られている。このため、この回転によって、挟む部分が機構の中央を軸に対称的に駆動する機構となっている。書籍を固定した後、めくられたページが自重により左側に倒れやすくするために、本試作では書籍全体の傾斜を $0 \sim 45^\circ$ で可変とした。

次にページ束はまとめて右側に倒し、紙弾性による起き上がり力を発生させるためにページ束を湾曲させる。このとき湾曲形状は、紙種によって多様な形状をとる必要がある。そこで本試作では、複数本の移動可能な支持棒を湾曲に沿って配置し、その上にシートを張ることで湾曲の弧の形状を変形させる機構とした。この機構により、紙が厚く、比較的大きな弾性力が発生する書籍の場合は緩やかな湾曲に、反対に紙が薄く、発生する弾性力が小さい書籍の場合は湾曲の曲率を大きく設置することが可能となる。この湾曲設置部の機構を Fig. 7 に示す。同図の上部にはシートを張る前の状態とシートを張った後の写真が示されている。ここでは片側のページの機構を示しているが、もう一方のページ側にも同じ機構が搭載されている。なお、シートを張る前の写真に示されるように、軸の1本には端面を支えるための板が設置されている。また、Fig. 7 の下部には機構の模式図を示している。破線は機構が移動できる自由度を示している。

なお、シート下には空間があり、Fig. 8 に示すように、ハードカバーの表紙や分厚い本のページの一部を収容できる構造と

Fig. 8 Holding of the hard cover book

Fig. 9 Details of head of manipulator

Fig. 10 Head of manipulator

なっている。

3.4 ページめくりアーム部

めくりアーム部は、めくりヘッドと端面押し付け・搬送部の二つの部分から成る。

3.4.1 めくりヘッド

めくりヘッドは、設置した湾曲形状と端面の形状を維持しながら紙の起き上がりを押さえる役割と、1枚ずつ解放する役割の二つを担う。これは、人間がページめくり操作を行う際の親指に相当する。提案装置では、これら二つの役割を担うために、1枚ずつページの解放を行う薄い金属板と、端面を面接触で押さえる円柱状のゴムを、同一のプレートに設置したものをめくりヘッドとして搭載する。Fig. 9 にめくりヘッドの模式図を示す。また、Fig. 10 にめくり動作中のめくりヘッドを示す。

金属板（以下、つめと呼ぶ）は、薄いへら状のものを利用する。本試作では厚さ 0.2 [mm] のステンレスで製作した。同材質は適度に変形する剛性を持つ必要性があり、実験的に選んだ。このように変形する素材を利用することで、端面の面方向とめくりヘッドの移動平面を平行に維持するための設置精度の不足

Fig. 11 Conveyor of the page turner head

を補っている。また、つめ形状は三角形とし、つめの先端は書籍を傷つけないよう丸みをつける。本試作では、Fig. 9 に示されるように、半径 3 [mm] の円弧とした。

つめの設置によって、Fig. 4 に示されるような方向の力が発生する。そのため、つめのみではページ束全体を押さえきれず、ページ束が滑り出てしまうため、円柱状の押さえ（以下、ホルダーと呼ぶ）をつめの後方に設置する。同設置位置は、つめから紙面 1 枚分後方に設置することが望ましいと考えられる。ただし、このような厳密な設置は難しいため、実験では 5 枚分程度後方に設置して運用した。同部は、弾性力により起き上がろうとする紙束を押さえ、書籍のページ残量に拘らず端面の形状を一定に維持する役割を果たす。本試作では、直径 12 [mm] のウレタンゴムを使用した。ホルダーの材質は、書籍を傷つけないものであれば、ウレタンゴム以外でも利用可能であると考えられる。また、Fig. 9 に示されるように、ヘッドの移動中にずれが生じないように、ホルダーは左右二つ設置した。これら一つのつめと二つのホルダーは同一プレートに設置され、プレートの移動に伴ってすべてが一体となって移動する。

3.4.2 端面押し付け・搬送部

端面押し付け・搬送部は、上記のめくりヘッドを端面に押し付ける部分と、ヘッド搬送用の駆動機構から成る。Fig. 11 に同部の構成を示す。

弾性力を持つページ束に対し、常に一定の押し付け圧力で端面を押さえる必要がある。そこで、端面押し付け部にはエアシリンダを用いている。この力が大きいと端面を傷つけ、小さいと書籍の弾性力を下回るため押さえられない問題がある。今回の試作では実験的に 40 [N] 程度で端面を押し付ける構成とした。厳密には同条件は書籍に応じて調節する必要があるが、4 章の実験ではすべて同じ条件で行った。また、めくりヘッドを書籍縦軸と垂直な直線方向に搬送するために、ボールネジとリニアガイドによる直線駆動機構を用いる。同駆動の向きは自由に変更可能となっている。この向きは、Fig. 4 に示されるように、書籍設置後の端面と平行で綴じ部と直交する方向に移動するように調整するものとする。同方向は、端面に対する押し付け圧力が移動中に一定となる要請から決定した。

試作した装置では、1 ステップ 2 [μm] の精度を備えた駆動系を採用した。本装置が対象とする書籍の紙厚は 50 [μm] 以上であり、Fig. 4 に示すように、ページの紙端の間隔 l [μm] は少な

Fig. 12 Holder of the turned pages

くとも紙厚 m [μm] 以上であると考えられるため、この精度が紙幅の間隔より短い搬送の要求を十分に満たすと言える。駆動範囲は 120 [mm] のものを採用した。この駆動範囲は、本装置で対象とする最大 50 [mm] の厚さの書籍を一度にめくる場合でも、十分な長さである。

3.5 送風

起き上がったページは、3 段階の送風により左側に搬送される。Fig. 5 と Fig. 10 に各送風の位置を示す。送風 1 は、解放されたページと次ページを剥離するために、解放されたページとつめにより押さえられている次ページとの隙間に、ノズルにより局所的に吹き込む補助送風の役割を担う。同送風部は Fig. 10 のようにつめ上部に設置され、最上のページのみをページ束から剥離する。送風 2 は剥離されたページを装置左側へと搬送するために、装置右側から送風を行う。送風 3 は特に分厚い紙の書籍や幅の狭い文庫本の場合に、左側に搬送されたページが弾性力により再び起き上がることを防ぐために、装置上方から下向きに吹き下ろす送風である。本試作では、送風 1 の風量は 8.5×10^{-5} [m^3/min] とした。送風 2 は、4.5 [m^3/min] の風量とした。送風 3 の風量は 2.3 [m^3/min] とした。これらの値は実験的に決定した。

3.6 ページ押さえ

めくられたページが常に見開きの状態にあるように、送風 3 に加え回転羽によりページを押さえる。Fig. 12 に示されるように、ページの通過をセンサが検出すると、回転モータに取り付けられた 4 枚の羽がページを押さえるように回転する。書籍を電子化する場合、書籍紙面上に遮蔽物がないことが重要となるため、カメラによる撮像のタイミングを超えた後に押さえることとする。ページ通過の検出については次節で詳述する。

3.7 紙面の搬送計測

ページの搬送状態を計測する機能について述べる。本装置では、各ページの起き上がり、装置左側までめくられた瞬間を検出する。これらを検出することで、前節で述べたページ押さえの回転を制御する。本試作では、センサとして二つの反射型ファイバセンサを用いた。使用したセンサは、KEYENCE のファイバユニット FU-66Z と同社のデジタルファイバアンプ FS-N11N である。センサの応答時間は 1 [ms] とした。Fig. 13 にセンサ 1 とセンサ 2 の設置位置を示す。

センサ 1 は、ページの起き上がりの瞬間を測るために、めくられる前の右側の最上ページの表面を観測するように設置される。同センサは、ページが起き上がることで変化するセンサと紙

Fig. 13 Configuration of the sensors controlling the holder for the turned pages

面間の距離を計測する。センサ2は装置左側に設置され、ページの搬送が終了したことを検出する。

4. めくり性能評価実験

4.1 異なる機構条件下での性能評価

4.1.1 評価方法

提案装置のめくり性能について、評価実験を行った。本実験では、ページめくり速度を 300 [pages/min] 程度とした。めくり精度の評価は、実際の書籍電子化のシステム環境を想定し、装置上方に設置した高速カメラを用いて行った。実験の様子を **Fig. 14** に示す。使用したカメラの解像度は $1,280 \times 1,024$ 、フレームレートは 500 [fps] である。また、本論文における実験では、端面が揃っていることを前提とした。実験は通常の室内で行われており、温度は $15 \sim 20^\circ\text{C}$ 程度、湿度は 40% 程度であった。

本実験では、紙面に印字されたバーコードを利用することでめくり精度の評価を自動で行った。具体的には、各ページが識別できるバーコードを、ページの綴じ部側、中央、端面側の3か所に記載した評価用の書籍を作成した。使用した紙は坪量 $80 [\text{g}/\text{m}^2]$ 、紙厚 $100 [\mu\text{m}]$ であり、書籍のページ数は 200 ページ、サイズは B5 判である。なお、評価として Optical Character Recognition (OCR) を利用することも考えられる。ただし、同技術の認識率は文字種や画像の回転、歪みに影響を受けるため、100%の精度を常に保証することは困難であると考えられる。そこで、今回は、めくり機を利用するセンシングシステムや読み取る書籍のコンテンツに関係なく評価を行うことを目的とし、すべてのページが遮蔽によって隠れることなくめくられたかどうかを明確に検証するために、OCR による評価を採用しなかった。

今回は、1 ページ内の 3 か所すべてのバーコードが 1 枚の撮像画像の中で認識された場合に、同ページは重送なく「めくられた」と判定する。この条件の下、書籍 1 冊全ページ数に対して、めくられたと判定されたページ数の割合を成功率とした。なお予備実験の結果、大きな歪みやブレが生じない限りにおいて、バーコードの誤検出が起らないことを確認した。

実験条件は、提案機構、送風 1 を用いない機構、めくりヘッドがつめのみ、およびめくりヘッドがホルダーのみの 4 種類とした。また、各条件につき 10 試行ずつ、計 40 試行を行った。

Fig. 14 Experimental setup

Fig. 15 Examples of the detected barcodes on the page

Table 1 Evaluations of the configuration under four different conditions

condition	number of trials	average velocity [pages/min]	average success rate [%]
proposal condition	10	314	100
without 1st blower	10	309	99.2
without holder	10	—	56
without stop	10	339	88.8

4.1.2 結果

めくり動作中のバーコード検出画像を **Fig. 15** に示す。バーコード上の各四角は、バーコードが検出されたことを表している。また、めくり性能評価実験の結果を **Table 1** に示す。今回提案するすべてを兼ね備えた機構条件において、速度 300 [pages/min] 以上で、本実験ではめくり成功率 100% を達成した。同機構は、他の条件と比較しても、つめのみの場合やホルダーのみの場合より性能が良いため、つめとホルダーの併用が有効であることが分かる。また、送風 1 については、わずかな性能差であるが、効果が確認された。書籍電子化では、100% に限りなく近いめくり精度が求められるため、このような機能も搭載が必須となると考えられる。なお、つめのみの条件において速度が明示されていないのは、途中で紙束が滑り出し、めくり操作が安定せず、適切なめくり速度を算出することができなかったためである。

また、提案機構条件下のある試行における、各ページに対するめくられたと判定された持続時間を **Fig. 16** に示す。ページによって、めくれるタイミングにばらつきがあるものの、書籍の全ページに対して重送なくめくり動作が達成されていることが確認された。なお、めくりの序盤に持続時間が長いページが確認されるが、これは書籍に開き癖がついており、このページが長い時間開かれていたためである。

Fig. 16 Duration detecting barcodes for each page

4.2 異なる紙質の書籍における評価実験

4.2.1 評価方法

前節で述べた実験において成功率の高かった提案機構について、紙質の異なる書籍を用いて実験を行った。具体的には、実験用に作成した書籍2種と、市販の書籍2種の計4種の書籍を用いた。作成した書籍は薄紙（坪量 $64 \text{ [g/m}^2\text{]}$ ，紙厚 $60 \text{ [}\mu\text{m]}$ ，B5判，250ページ）と厚紙（坪量 $128 \text{ [g/m}^2\text{]}$ ，紙厚 $150 \text{ [}\mu\text{m]}$ ，B5判，224ページ）である。市販の書籍は、ハードカバー（三宅洋一：分光画像処理入門。東京大学出版会，2006，216ページ）と新書（森博嗣：大学の話をしましょうか 最高学府のデバイスとポテンシャル。中央公論新社，2005，192ページ）である。

なお、本実験では書籍にバーコードが記載されていないため、高速カメラでめくりの様子を撮影した後、目視により性能を確認した。撮像された画像を Fig. 17 に示す。具体的には、各ページに記載されたページ番号で確認した。ページの四隅が1枚の画像の中で同時に確認された場合に、同ページは「めくられた」と判定した。本実験では、各書籍に対し5試行ずつ、計20試行を行った。

4.2.2 結果

めくり性能評価実験の結果を Table 2 に示す。平均速度と平均成功率は、薄紙（坪量 $64 \text{ [g/m}^2\text{]}$ ）で 301 [pages/min] ，100%を、厚紙（坪量 $128 \text{ [g/m}^2\text{]}$ ）と市販の書籍で 300 [pages/min] 以上、98%以上を達成した。このような結果より、坪量の異なる紙でも提案する装置が有効であることを確認した。

ここで、薄紙以外の紙において、めくり成功率が低下した原因について考察する。

厚紙の書籍では、ほぼ安定的にめくれていたが、書籍の残りのページが少なくなった時点で重送が発生した。このような時点では、下側に設置されたホルダーが、書籍下部のシートに先に当たる。この結果、シート面と端面がわずかに平行に設置されていなかったため、端面とヘッドの駆動方向の平行度を保つことが困難となった。このような理由により、ページの残量によって動作性能が低下したと考えられる。この現象はいかなる紙質の場合でも起こり得るが、ページ間隔が十分に広ければこれまでの実験でも示されたように問題となっていなかった。今回、厚紙の場合は弾性力が大きく、湾曲の曲率を十分に大きくとる設置をしなかったため、ページの間隔が想定より狭くなったと考えられる。対処法として、書籍の湾曲を支えるシートの構造を見直す、押し付け圧力の強いヘッド構造を採用して曲率を大

Fig. 17 Examples of the observed images

Table 2 Evaluations of the configuration using four different books

paper quality	number of trials	average velocity velocity [pages/min]	average success rate [%]
thin-paper book	5	301	100
thick-paper book	5	339	98.4
hard cover book	5	341	98.3
paperback book	5	333	99.2

きくると、書籍のページ残量によってヘッドの条件が変化しないように、書籍とシートの上に端面の続きとなるように追加的に紙束を設置するなどの方法が考えられる。

ハードカバーの書籍では、綴じ方が丸背で小口がへこむように湾曲しているため、端面を平面状に保つことが困難である。このため、特にめくりの序盤と終盤で重送が何度か発生した。丸背の書籍については、紙端の間隔が一定にならないことがあり得るため、紙束の湾曲の曲率を大きくして紙端の間隔を十分に広くとる、または紙端の間隔をリアルタイムにセンシングしてヘッド駆動の送り量を制御するなどの対処法が考えられる。

新書の書籍では、ある特定のページ同士が剥離しにくくなっており、試行の度に同じページで重送が発生した。書籍の癖や付着物などにより開かないページがある場合、めくり機では重送を防ぐことができない。そのため、めくる前に確認する、重送を検知して発生次第めくり操作を止める、センシング側で重送の発生したページを記録するなどの改善策が考えられる。

5. ま と め

高速な書籍電子化技術の実現に向けて、高速かつ正確な書籍自動めくり機の設計と試作を行った。提案する装置は、紙の弾性力と送風を利用して、非接触で高速に紙面を搬送する機構に基づいたものである。性能評価実験の条件の下、提案する装置において、平均的な厚さの紙の書籍を正確に 300 [pages/min] の速度でめくりことができることを示した。また、その提案機構において、紙厚や大きさについて異なる条件の書籍に対しても高いめくり性能を達成した。以上のことから、提案装置が様々

な紙質の書籍に対して、高速性と正確性を両立できる見込みが十分に高いことが確認された。

今後の実用化に向けては、様々な環境や書籍に対応するためにシステムを発展させていく必要があると考えられる。例えば、より安定的なめくり性能を達成するため、端面の状態に合わせためくり動作を行えるように、センサフィードバック機能を導入する予定である。具体的には、書籍端面の形状を計測し、紙端間の距離を取得し、得られた紙端の間隔に合わせて、めくりヘッドの移動量を制御する方法が考えられる。この機構により、丸背などの端面の揃っていない書籍において重送が減ることが期待される。また、設置の簡略化に向けて、書籍の自動設置が必要であると考えられる。加えて、雑誌など紙が薄く静電気の起きやすい書籍への対応や、重送やその他エラーが起きてしまった場合の検知・停止機能の搭載、また、温度や湿度の変化など多様な環境にも対応することが課題である。

参 考 文 献

- [1] T. Nakashima, Y. Watanabe, T. Komuro and M. Ishikawa: "Book flipping scanning," Adjunct Proceedings of 22nd Symposium on User Interface Software and Technology (UIST2009), pp.79-80, 2009.
- [2] 有間英志, 糸山浩太郎, 山田雅宏, 小室孝, 渡辺義浩, 石川正俊: "高速3次元センシングによる適応的撮像を行う高精細書籍電子化システムの提案", 第17回画像センシングシンポジウム (SSII2011) 論文集, IS2-17, 2011.
- [3] Y. Watanabe, K. Itoiyama, M. Yamada and M. Ishikawa: "Digitization of Deformed Documents using a High-speed Multi-camera Array," Proceedings of the 11th Asian Conference on Computer Vision (ACCV 2012), pp.394-407, 2012.
- [4] H. Shibayama, Y. Watanabe and M. Ishikawa: "Reconstruction of 3D Surface and Restoration of Flat Document Image from Monocular Image Sequence," Proceedings of the 11th Asian Conference on Computer Vision (ACCV 2012), pp.350-364, 2012.
- [5] 白井則夫: "紙を挟み込んで搬送するベルト", 日本機械学会誌, vol.108, no.1044, pp.856-857, 2005.
- [6] 竹平修: "複写機", 日本機械学会誌, vol.108, no.1044, pp.844-847, 2005.
- [7] 奥名健二, 西垣戸貴臣, 椎名倭: "用紙ガイドの摩擦抵抗を考慮した用紙挙動解析", 日本機械学会論文集 (C 編), vol.60, no.575, pp.2279-2284, 1994.
- [8] 程輝, 吉田和司: "紙葉類分離挙動のシミュレーション", 日本機械学会 IIP 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, pp.125-127, 2007.
- [9] 北沢進, 小林英敏, 中沢賢: "摩擦力・スライドアーム方式" 1 枚分離機構およびページめくり器, 特許第 4508605 号, 2005-06-02.
- [10] 増山知也, 坂上永悟, 深津邦夫, 三ツ谷祐輔, 浅利幸生, 井上克己: "多様な書籍に対応するページめくり機械の設計と評価", 日本機械学会論文集 (C 編), vol.72, no.714, pp.292-298, 2006.
- [11] 橋本巨: "紙送りにおけるトライボロジック的挙動解析", 日本機械学会 IIP 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, pp.11-16, 2004.
- [12] 岡本紀明: "ゴムローラによる紙搬送特性解析", 日本機械学会 IIP 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, pp.5-10, 2004.
- [13] 山浦弘: "ゴムローラによる紙送り特性", 日本機械学会 2007 年度年次大会講演資料集 (8), pp.382-384, 2007.
- [14] Qidenus Technologies, RBS Full.
- [15] Kirtas, APT BookScan.
- [16] Treventus, ScanRobot 2.0MDS.

溜井美帆 (Miho Tamei)

2011 年東京大学工学部計数工学科システム情報工学コース卒業。2012 年同大学大学院情報理工学系研究科技術補佐員。2013 年同大学大学院総合文化研究科修士課程入学。現在に至る。

(日本ロボット学会正会員)

渡辺義浩 (Yoshihiro Watanabe)

2007 年東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。2004~2007 年日本学術振興会特別研究員。2007 年同大学大学院リサーチフェロー。2008 年同研究科特任助教。2011 年同研究科助教。現在に至る。高速ビジョン、超並列プロセッサ、実時間画像センシング、映像メディア、デジタルアーカイブ等に関する研究に従事。博士 (情報理工学)。2008 年度日本ロボット学会論文賞。2008 年度 3 次元画像コンファレンス優秀論文賞。2009 年度エリクソン・ヤング・サイエンティスト・アワード。2011 年度画像センシングシンポジウム優秀学術賞。2011 年度日本バーチャルリアリティ学会論文賞。2013 年日本印刷学会技術奨励賞。日本印刷学会研究発表奨励賞。

(日本ロボット学会正会員)

山田雅宏 (Masahiro Yamada)

2004 年東京農工大学生物システム応用科学研究所博士前期課程修了。同年大日本印刷株式会社に入社。現在製版・プリメディア研究所にて検査・計測装置の研究開発に従事。2010 年画像センシングシンポジウムオーディエンス賞。2011 年度画像センシングシンポジウム優秀学術賞。2013 年日本印刷学会技術奨励賞。日本印刷学会研究発表奨励賞。

石川正俊 (Masatoshi Ishikawa)

1979 年東京大学大学院修士課程修了。同年通産省工業技術院製品科学研究所に入所。1989 年東京大学工学部計数工学科助教授。現在東京大学情報理工学系研究科創造情報学専攻教授。2002 年度東京大学総長特任補佐。2004 年東京大学副学長。2005 年東京大学副学長 (2006 年まで)。超並列・超高速ビジョン、センサフュージョン、メタパーセプション等に関する研究に従事。工学博士。1998 年。2001 年。2008 年。2010 年日本ロボット学会論文賞。1984 年。2010 年計測自動制御学会論文賞。2004 年度同学会技術賞・友田賞。1990 年応用物理学会光学論文賞。2005 年同学会光・電子集積技術業績賞。2011 年度日本バーチャルリアリティ学会論文賞。受賞。2011 年紫綬褒章受章。(日本ロボット学会正会員)