

ファンクショナルエンドエフェクタの構築*

永谷 圭司*1, 白木 扶*2, 田中 豊*1

A Development of Functional End-Effector

Keiji Nagatani*1 and Mamoru Shiraki*2 and Yutaka Tanaka*1

*1 The Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University

*2 Dept. of Systems Engineering, Okayama University

Recently, various types of robot hand have been researched and developed. Most of them are multiple finger types that have multiple joints. However, each mechanism of them is complex, and usually enough grip power can not be formed. It seems that the most important objective of them is to make human-like hands. However, sometimes, it is reasonable that robot hands should have functional mechanisms instead of human-like fingers.

In this research, we developed an functional end-effector (hand) that has more practical use. It has two parallel fingers that has a large grasping power. It includes a functional mechanism of vision sensor and belt conveyers, which are not in human hand. Experiments verified each function, such as the grasping mechanism, the vision sensor's mechanism and the belt conveyer mechanism.

Key Words : Robotics, End-Effector, Parallel fingers, Vision sensor, Belt conveyer

はじめに

近年、ロボットによる物体のハンドリングの要求が高まる中、様々なロボットハンドの研究・開発が行われている。特に、人間と同様の把持能力を持たせることを目指し、人の手の形をした多指多関節のロボットハンドに関する研究は多い⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。また、これらの研究では、「どれだけ人間の手の動きに近づけるか」という点が重要視されている⁽⁴⁾。しかしながら、現在のところ人間の手のように十分な把持力を出せていないものが多い。さらに、各関節ごとにモータを使用するため、ハンド自体の重量が非常に重くなり、モータの多用により制御が複雑になるといった問題点がある。

これに対し、産業用ロボットのエンドエフェクタは、ある1つのタスクに対して、専用の機能的な機構を搭載している。そのため、より確実に目的タスクの遂行が可能であるが、他のタスクを行う場合には、他のエンドエフェクタに付け換える必要がある。つまり、1つのエンドエフェクタでは、1つのタスクしか遂行できないという問題点が存在する。

このような背景のもと、本研究では、家庭やオフィ

ス環境などにおいて、複数タスクを実現するための機能を搭載したエンドエフェクタの研究開発を行うこととした。

まず、本研究においてロボットハンドに要求する1つ目のタスクに「位置情報が不正確な対象物をつかみに行く動作」を想定する。この動作において有効な機能は、対象物確認のための視覚センサを用いたビジュアルフィードバックである⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。またこれに用いるCCDカメラは、把持直前まで対象物をとらえることができるように、ハンドの中心部(手の平の部分)に取り付けることが望ましい。しかしながら、この取り付け位置では、ハンドが対象物を把持した際にハンド内側のカメラを対象物が覆い、その後の動作にカメラが利用できなくなるという問題点がある。そこで、本研究では、ハンドの把持機構と連動して、カメラを上方向へスライドさせて、その視野を確保する機構を考案した。

また2つ目のタスクとして「机の上に横たわっている本を把持する動作」を想定する。この動作は現在のところ、多指多関節のロボットハンドによる複雑な動作計画を利用しても、実現困難なものである。そこで本研究では、ハンドの内側にベルトコンベア機構を付加することで、机上の本を引き上げる機構を考案した。

* 原稿受付 平成 16 年 6 月 3 日

*1 岡山大学 大学院 自然科学研究科

*2 岡山大学 工学部 システム工学科

Email: keiji@ieee.org

本研究では、上述の機能を搭載したファンクショナル エンドエフェクタ (FEE) を構築し、各種の基礎実験を行うことで、その有用性を検証した。

本稿では、製作した FEE の概要および、それぞれの機能を実現するための構造、さらに、FEE の機能の有用性を検証するための各種の基礎実験について報告する。

1. ファンクショナルエンドエフェクタ (FEE) の提案

1-1 FEE への要求事項 本研究では、「小物体の把持機構」「ハンド自体に視覚を持つ機構」「机の上に横たわる平らな物体 (書籍等) を引き上げて把持する機構」「パーソナルコンピュータへの接続を容易にしアームへの着脱が可能な機構」を有する FEE の実現を目指すこととした。以下に、本研究における FEE への具体的な要求事項を示す。

1-1-1 大きな把持力 FEE は、コーヒーカップなどの小物体の把持や、ドアノブの把持を目的としている。特に、ドアノブを把持し、これを回転させるためには、比較的大きな把持力が必要である。

1-1-2 把持点付近にカメラを搭載し、把持と同時にカメラをスライドさせる機能 把持対象物の位置が不確かな場合でも、ハンドが対象物を正確に把持するためには、把持を行うまでの間、視覚センサによって常に対象物がとらえられている必要がある。またそのためには、視覚センサは、把持点近傍にあることが望ましいが、把持点近傍にカメラを取り付けると、把持対象物によってカメラの視野が遮られる。このため、把持中には、視覚センサを利用することができないという問題点が生じる。これを解決するには、ハンドによる物体把持と連動して、CCD カメラをスライドさせ、視野を確保する機構が必要である。

1-1-3 机上の平らな物体 (書籍等) を把持するためのベルトコンベア機能 机の上に倒された状態で置かれている平らな物体 (書籍等) は、通常の平行ハンドでは、把持することが難しい。また、多指ハンドを利用する場合にも、複雑な動作計画を必要とする。これを、機構的に解決する一つの手段として、ハンドの内側にベルトコンベア機構を搭載し、本をハンド内に引き上げるといった手法が考えられる。

1-1-4 コントローラの搭載 アームへの着脱が可能な機構は、ロボットの機能のモジュール化という観点から重要な実現目標の一つである。そのため、FEE 内部にコントローラ用 CPU を搭載し、FEE に搭載しているすべてのモータを制御することが望ましい。さらに、FEE 内部のコントローラとロボットのコントローラとの間をシリアル通信で接続することにより、

FEE とロボット間のケーブルを少なくすることも重要である。

1-2 FEE の概要 本研究では、以上の要求事項を実現する機能を備えた FEE を構築した。図1に FEE の概観を示す。

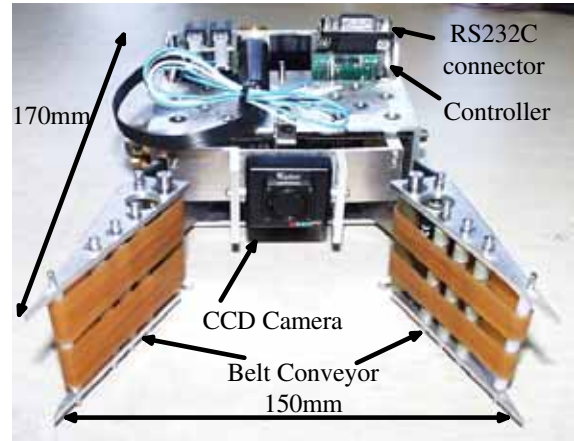


Fig. 1 An overview of functional end-effector

このハンドのアクチュエータには、MAXON 製の DC モータを採用している。また、軽量化をはかるために、部材にはアルミを採用しているが、把持部のみは、強度が必要とされるためステンレスを採用している。これにより、全重量は 910g となった。

把持部機構の先端の開き幅は 150mm、手首部分から先端までの長さは 170mm である。なお、手首の回転機構も FEE の一つの機能と考え、FEE に内蔵する構造となっている。

また、FEE 内に CCD カメラを搭載した。CCD カメラは通常、ハンドの把持部が開いている状態では、FEE の中心部 (人間の手でいえば手の平中央) にある。これが、対象物の把持動作の際、ハンドが閉まる動作に連動して、このカメラが上部に約 20mm スライドする機構となっている。これにより、把持後の視覚センサの視野が確保できる。

さらに、机の上に横たわっている平らな物体 (書籍等) を引き上げるため、把持部の左右に脱着式のベルトコンベア機構を搭載した。

以上の機能を統括するコントローラおよびモータドライバは、FEE 内に内蔵されている。このコントローラは、パーソナルコンピュータと RS232C を用いて接続することで制御が可能である。

次章より、この FEE の各機能に関する説明ならびに、動作検証実験について紹介する。

2. 基本機能

FEEの基本機能である物体の把持部および、手首の回転機構について以下に述べる。

2.1 把持部の機構 本研究で構築した把持部の構造を図2に示す。FEEは、把持部を両側から押さえつけることで把持動作を行う機構を有しており、中心を対称に逆方向にねじ切りされた30度台形ねじ(東洋シャフト株式会社製)が、これを可能としている。この台形ねじをモータにより回転させると、2つのフランジが同時に逆方向に移動する。これらのフランジが同時に内側に移動することで、把持部が挟み込まれ、大きな把持力を出すことが可能となる。また、把持物体を離す動作については、フランジを外側に移動させることで支えが外れ、さらに把持部の内側に取り付けられたスプリングの力で、この動作を実現する。

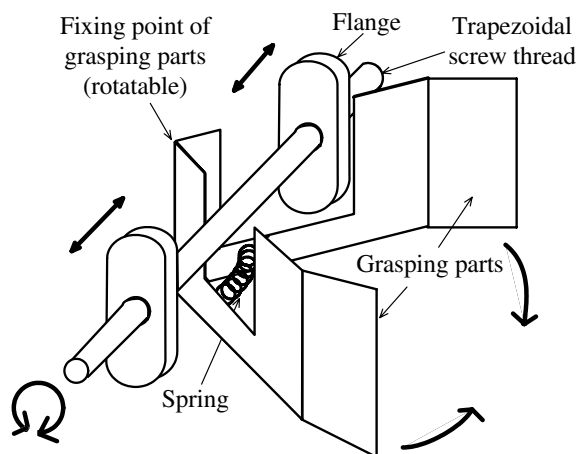


Fig. 2 A mechanism of gripping

2.2 把持力の測定 製作したFEEは、把持部が開いている状態と閉じた状態では、フランジが押さえられる場所が変化するため、最大把持力も変化する。そこで、この把持力の測定を行った。

測定方法はフォースゲージを使用した。まず把持部の先端から19mmの所にワイヤーを取り付け、それを地面と水平につり合わせる。次に、許容最大電圧である12Vをモータに与え、把持部が開き始めたときのフォースゲージの値を読みとった。また、同様にして、把持部が最も閉じたときの把持力も測定した。それぞれの測定を10回ずつ行い、平均値を求めたところ、把持力の最大値は8.23[N]、最小値は6.41[N]となった。これは、ドアノブを把持して回転させるのに、十分な大きさであった。

2.3 手首回転部の機構 本研究では、手首部分の回転機構をハンドの機能と考え、これをハンド内に搭載することとした。図3に手首回転部分の写真を示

す。この図に示す通り、モータが回転することにより、ギアと一体化しているベアリングホルダが回転する機構である。また、このベアリングホルダは、図3に示すセットカラーで押さええることによりシャフトから抜け落ちないようにした。このベアリングホルダをアーム側に固定することで、手首回転動作が実現される。

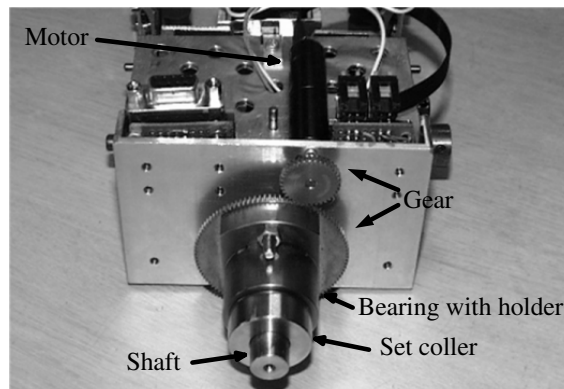


Fig. 3 A mechanism of wrist's rotation

3. カメラスライド部

FEEの中心部に小型CCDカメラを搭載することとした。また、このカメラは、把持動作に連動して、ハンドの中心部から上へスライドする機構とした。以下にこの機構の詳細を示す。

3.1 CCDカメラの仕様 FEEに搭載するデジタルCCDカメラは、把持部の内側に設置する必要があるため小型(薄型)かつ軽量である必要がある。そこで、本研究では、Watec社製のピンホールカメラWAT-230を採用した。このカメラの出力は、通常のNTSC信号である。

3.2 視野の確保 把持位置にエンドエフェクタが到達した際、対象物(小物体)によって遮られる視野から、カメラをどの程度スライドさせれば、有効な視野が確保できるかを、幾何的に検討した。

まず、把持対象を、高さ50mm、幅35mm、奥行き60mmの対象物(把持部とほぼ同サイズ)とした場合の、CCDカメラの視野について検討する。搭載するCCDカメラの画角が40度であるため、カメラがスライドしなければ、図4-(A)に示す通り、対象物を把持した後に、視野が確保できない。また、これより小さい対象物であっても、把持部自体が閉じることで視野は遮られる。

これに対し、把持動作後、CCDカメラの位置が20mm程度上昇することになれば、図4-(B)に示すように十分な視野を確保することができる。また、これより大きい物体についても、把持点を考慮するこ

とで、視野は確保できると考えられる。

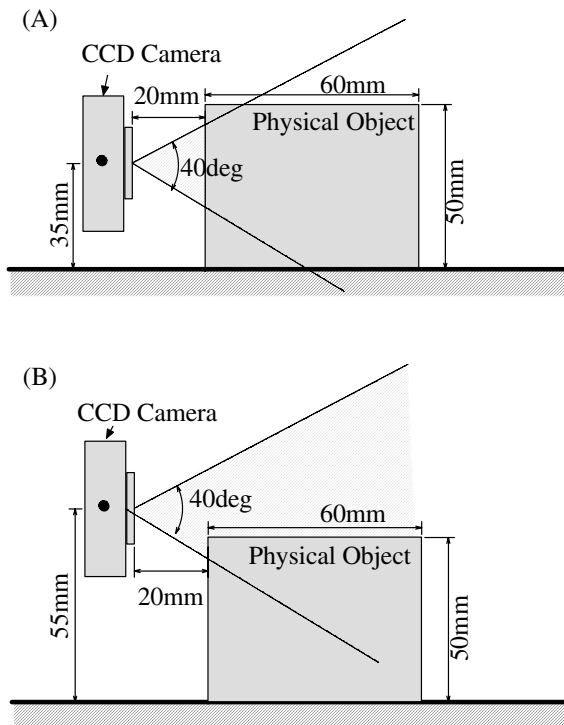


Fig. 4 A view of mounted CCD camera

3.3 カメラスライド機構 カメラをスライドさせるために、別のアクチュエータを取り付けることは、ハンド自体の重量を増加させ、また制御も複雑化させる。そこで、本研究ではこのような方法はとらずに、把持部に使用したアクチュエータと連動して、カメラのスライド動作を行う新たな機構を考案・製作することにした。製作したカメラスライド部の構造を図5に示す。

この機構では、2つのカメラリフトが、それぞれ図2に示したフランジに固定されている。このフランジが把持部を挟む際に、カメラリフト間の距離が徐々に狭くなり、CCDカメラに取り付けられたスライドガイドブロックを持ち上げる。つまり、カメラリフトのスロープ部分を利用し、スライドガイドに沿ってカメラが上へ持ち上げられる構造である。また、このCCDカメラは、スプリングによってエンドエフェクタの枠組みに連結されているため、ハンドが開くとスムーズに中心部(もとの位置)へ戻ることができる。

なお、スライドガイドが長ければ長いほど、移動後のカメラの視野を大きく確保できるが、その場合、カメラリフトのスロープを大きく取らなければならなくなり、さらにこのガイドがハンドから大きくはみ出してしまふことになる。そこで、本FEEでは、カメラの最大移動距離を20mmとして設計することにした。

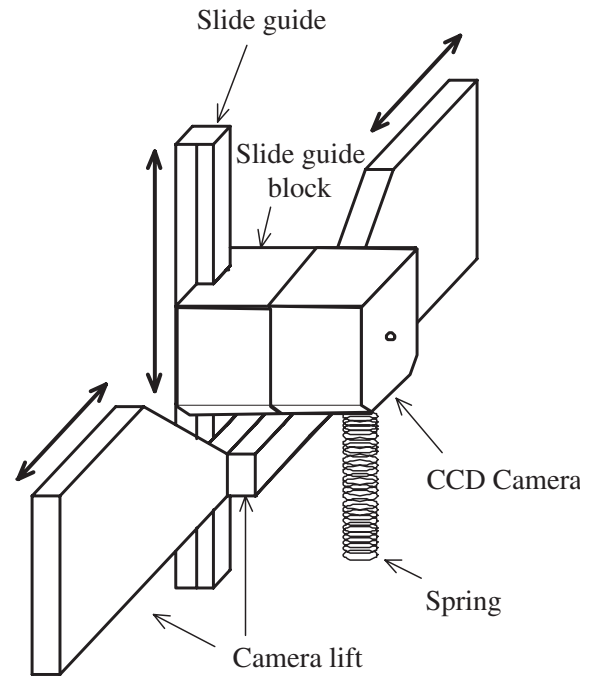


Fig. 5 A slide mechanism of CCD camera

3.4 視野確保の確認実験 対象物把持後、CCDカメラのスライド機構を用いて視野が十分に確保できるかどうかを確認するために、確認実験を行った。現段階では、FEEを搭載するマニピュレータが整備中のため、この実験では、まず実験者が直接FEEを把持し移動させることで、有用性をはかることとした。なお、その際、実験者は対象物を目視せずに、CCDカメラから得られる画像情報のみを利用した。

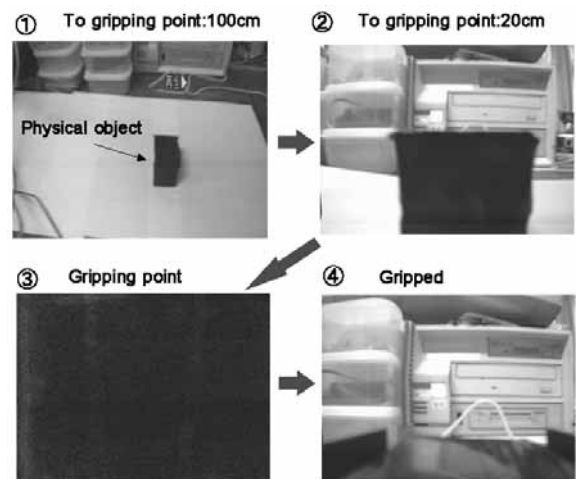


Fig. 6 Detected images in an experiment

図6にCCDカメラから得られた一連の動作の画像を示す。は対象物までの距離が100cmの地点における画像であり、対象物が視野内に収まっていること

が確認できる．この対象物が常に視野内に入るように注意しながら，FEE を対象物に近づける． は，対象物までの距離が 20cm の地点における画像である． は，ほぼ把持位置に到達したときの画像であり，対象物によって視野が遮られたことがわかる． は，把持動作後の画像である．カメラがスライドすることで，把持後に視野を確保できることがわかる．

3.5 考察 図 6 の より，CCD カメラより得られた画像を見ながら，FEE を対象物の把持位置へと近づけることが可能であることがわかる．また， より，把持段階では，一旦カメラの視野が対象物によって遮られるが，把持後すぐに， に示すようにその視野の確保ができるため，把持後の動作においても，この CCD カメラの画像が利用可能であることがわかった．

4. ベルトコンベア部

本研究における，もう一つの主要なタスクである「机の上に横たわっている平らな物体（書籍等）をつかむ動作」を実現するため，ベルトコンベア機構の設計・製作を行った．この機構を利用することで，従来のハンドでは不可能であった，机上の本の引き上げ，把持動作が容易に可能となる．このアイデアを Fig.7 に示し，以下に機構の詳細を説明する．

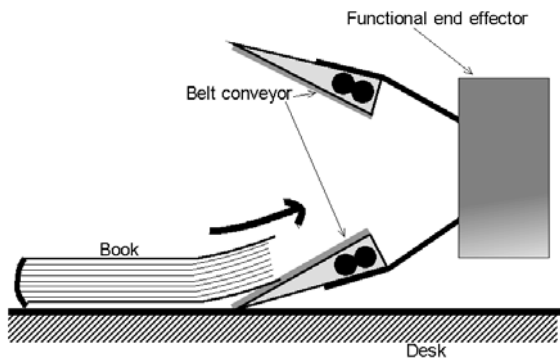


Fig. 7 An idea to lift a book up using a belt conveyor

4.1 ベルトコンベア機構 ファンクショナルエンドエフェクタに搭載するベルトコンベア機構の概略を Fig.8 に示す．この機構を把持部の左右それぞれに付け加えることにより，ハンドの向きに関わらず，上下どちら側からでも，本の引き上げ動作が可能となる．搭載したベルトコンベアは，対象物（書籍等）とゴムバンドが接触する構造である．このゴムバンドは，内部のモータを回転させることによって動き，接触している対象物を引き上げる．つまりゴムバンドと対象物との間の大きな摩擦力を利用することで，対象物の引き上げを可能としている．なお，このベルトコンベア

機構は容易に取り外し可能とした．

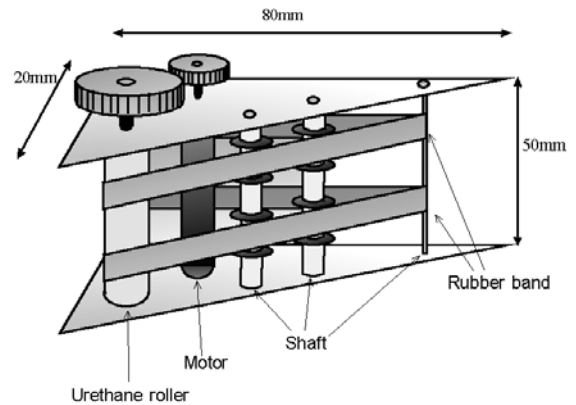


Fig. 8 A mechanism of a belt conveyor

実際に製作したベルトコンベア部を図 9 に示す．材質は軽量にするため，アルミ材を採用した．また，8cm × 5cm のサイズ内に，モータやその他の部品を搭載できるように，直径 10mm の小型の MAXON 製 DC モータを採用した．このモータを回転させることにより，ウレタンローラが回転し，中心部分から左右対称に，それぞれ 3 本ずつ配置されたゴムベルトを回転させる．

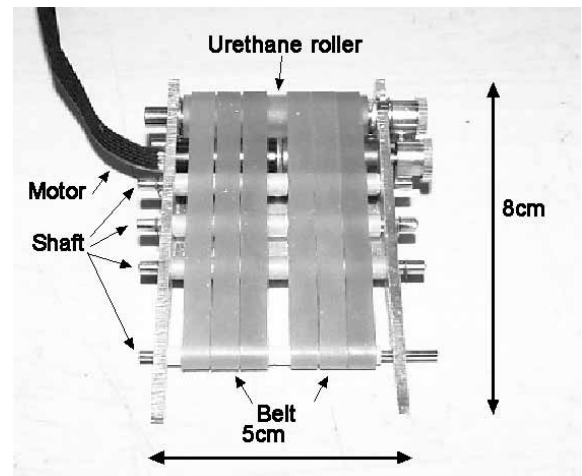


Fig. 9 A photograph of a belt conveyor

4.2 本の引き上げ実験 搭載したベルトコンベア機構により，どの程度の重量の本を引き上げることができるかを確認する実験を行った．

対象物として 200g ~ 1600g までの 15 冊の本を用意する．ただしこれらの本はすべて，表紙，裏表紙の材質が硬くないものとした．これを用いて様々な重さの本を引き上げる実験を行い，どの重さの本まで持ち上げられるかを検討する．

まず，机の上の本に対し，ベルトコンベアの先端を

約 10 度で本と机の間に滑り込ませる。ハンド先端のベルトコンベアのベルト部分が本に接触するところまで挿入した後に、ベルトコンベアを回転させて本を引き上げる。

この流れの実験をそれぞれの重量の本に対して 1 回ずつ行い、本を引き上げることができれば成功とし、引き上げられなければ失敗とする。この結果、200g、300g、1500g、1600g の本の引き上げには失敗したが、その他の重さの本は引き上げに成功した。

4.3 考察 200g と 300g の比較的軽い本を引き上げることに失敗した原因は、ベルトコンベアの先端を本と机の間に入れる際に、軽量の本が逃げてしまい、結果として引き上げる状態にまで達しなかったことにある。これらは、挿入部の先端を工夫することで、解決できると考えられる。

一方、1500g、1600g の本の引き上げに失敗した原因としては、本が重すぎるため、ベルトコンベアが本を引き上げようとする摩擦よりも、本が机と接触している部分の摩擦が大きくなり、引き上げられなかったということが考えられる。これを解決するためには、まずゴムベルトの摩擦力を大きくしなければならない。しかしながら現実的には、1500g の本は電話帳であり、通常ここまでの重量の本の引き上げを要求されることはあまりない。以上の結果より、このような単純な機構でも、400g ~ 1400g までの本の引き上げが可能であることが分かった。

なお、本実験では、すべてソフトカバーの本で実験を行ったが、ハードカバーの本の引き上げには、ベルトコンベアの挿入角をさらに工夫しなければならないであろう。

5. FEE コントローラ

様々なマニピュレータに取り付け可能なロボットハンドの構築では、ロボットコントローラへの接続が容易であり、かつアームからの取り外しも容易である機構が重要であると考えられる。そこで、FEE の内部に統括コントローラおよびモータドライバを搭載し、ロボットコントローラとの間をシリアル通信のみで接続する FEE コントローラを構築した。

FEE に搭載するコントローラの CPU には、シリアル通信が可能な超小型マイコン H8-3664 を採用した。また、モータを制御するために必要なモータドライバに L293E、アップダウンカウンタに PIC (小型マイクロコンピュータ) を採用した。これにより、コントローラを FEE の内部に搭載することが可能となった。

FEE コントローラに要求される主要な能力は、各

モータの制御である。本研究で設計・製作された FEE 内には、モータが計 4 個搭載されているが、このうちエンコーダを利用して位置制御を行う必要があるものは、手首に使用するモータのみである。そこで、このモータについては、エンコーダ情報を利用したフィードバック制御を行うこととし、残りのモータについては、回転方向とモータの電圧を指定するオープン制御とした。なお、モータに対する入力電圧の制御については、PWM (Pulse Width Modulation) 方式を採用した。

また、ロボットのコントローラと H8-3664 の間は、RS232C を用いたシリアル接続で通信を行うこととした。これにより、ハンドに対する動作指令 (各モータに与える電圧値および、手首回転量) を、シリアル通信を用いて指定できるようにした。その結果、ケーブルの本数を電源とシリアル通信の計 4 本に抑えることができた。

図 10 に実際に製作したコントローラを示す。この図では、モータドライバは 1 つだけしか見えていないが、もう 1 つのモータドライバは H8-3664 のボードの下に隠れている。なお、基板の形をコの字形に設計しているのは、この基板を FEE 内部に取り付けるためである。

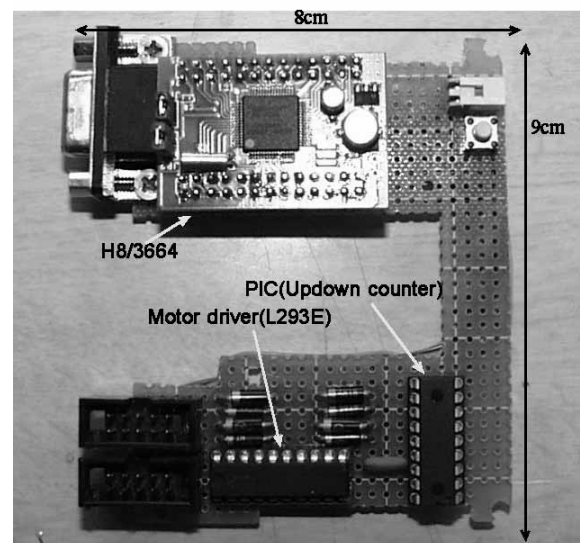


Fig. 10 A photograph of the controller

おわりに

本研究では、把持機構、CCD カメラのスライド機構、ベルトコンベア機構を搭載したファンクショナルエンドエフェクタの設計・製作を行い、それぞれの機構を制御するコントローラを製作した。また、各機構に対して、基本性能実験を行い、その有効性を評価し

た．また，それにより，この FEE について以下の知見を得た．

1. 目標とした把持力を出している．
2. CCD カメラのスライド機構は，上下に約 20mm であるが，これだけの移動範囲であっても，小物体把持後の視野は十分に確保できた．
3. ベルトコンベア機構を使用することにより，ロボットハンド単体では実現が困難な，机の上の本を把持するという動作が可能となった．
4. それぞれの機構を制御するコントローラの構築を行い，シリアル通信を用いた PC からの制御を可能とした．

今後の検討点としては，まず，実際に FEE を既存のアームに搭載し，アームの動きを含めた一連の動作のタスクを行い，把持力，ベルトコンベア，カメラの視界の有用性の確認を行うことが挙げられる．また，現在の FEE の総重量は 910g なので，小型アームへの搭載については，まだ難しい．このため，FEE をより軽量化する方法を検討する段階にある．

文 献

- (1) Lovchik, C. and Diftler, M.: The Robonaut Hand: A Dexterous Robot Hand For Space, in Proc. of IEEE International Conf. on Robotics and Automation, (1999) pp. 907-912.
- (2) 久野拓也, 細田耕, 浅田稔: 視覚サーボと内力の制御の統合に基づく多指ハンドによる操り, 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 5, (2001) pp. 646-651.
- (3) 小松恒雄, 川崎晴久, 内山和直: サーボモータ内蔵方式による人間型ロボットハンド (岐阜ハンド), ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集, (1998) 1CIII2-5
- (4) 原田研介, 中野慎也, 金子真, 辻敏夫: 複数対象物の操り, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 2, (2000) pp. 78-85.
- (5) Hauck, A., Sorg, M. and Farber, G.: On the Performance of a Biologically Motivated Visual Control Strategie for Robotic Hand-Eye Coordination, in Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2000).
- (6) 永谷圭司, 油田信一: タスクオリエンテッドアプローチによる自律移動マニピュレータの研究—ドアの通り抜けを含む屋内の自律走行の実現—, 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 6, (1999) pp. 111-121.
- (7) 今井睦朗, 並木明夫, 橋本浩一, 金子真, 石川正俊: 視覚フィードバックを用いた高速ハンドシステムの開発, 第 20 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (2002) 3E11.