

ホールセンサを用いたルービックキューブの 回転認識デバイス

東南 颯^{1,a)} 寺田 努^{1,2,b)} 塚本 昌彦^{1,c)}

概要: 近年, センシング技術や無線通信技術の発展による玩具の IT 化が進みつつある. 玩具を IT 化することは, 新たな遊びの手法やパフォーマンスを生み出すだけでなく, センシング技術により玩具の動きを解析することで, プレーヤへ技のフィードバックを行うという新たな練習の支援手法も見出すことができる. 本研究では, IT 化の対象として, 6 面の色を揃えることを目的とする立方体パズルであるルービックキューブに注目する. ルービックキューブの構造は特殊で, 一つの面に存在する各列 (行) を任意の方向に回転できる. このルービックキューブの様々な種類の回転を認識することを目的としたデバイスを作成する. 本研究で用いたホールセンサと磁石による認識手法では, 高速な回転でも認識することができた. また, このデバイスの応用例として, ルービックキューブの練習を支援するアプリケーションおよびデバイスを文字入力インターフェースとして用いるアプリケーションを作成した. 今後は作成したデバイスの小型化や認識精度の向上を目指す. またより有用性のある用途を模索する必要がある.

1. はじめに

近年, センシング技術や無線通信技術の発展による玩具の IT 化が進みつつある. 例えば, けん玉に加速度センサやジャイロセンサを搭載し, けん玉の技や, 上手さを判定することで世界のプレーヤと対戦ができるもの [1] や, Bluetooth を搭載し, 音や映像に合わせて光らせ方を自由に制御できるスマートヨーヨー [2] などが挙げられる. また, Guinness ら [3] は, 最初から IT 玩具として発売されているものを改造して新たな入出力デバイスとして利用している. このように玩具の IT 化は, 新たな遊びの手法やパフォーマンスを生み出すだけでなく, けん玉の例のようにセンシングによる技のフィードバックを行うといった新たな練習の支援への応用や, 新たな入出力デバイスとして使用するというような玩具以外の用途への応用も期待できる.

そこで本研究では, 立方体パズルであるルービックキューブ [4] に注目する. ルービックキューブとは, 立方体の 6 面がそれぞれ 9 個の正方形に分割されたパズルのことである. ルービックキューブの構造は特殊で, 一つの面に存在

する各列 (行) を任意の方向に回転できる. この構造により, 回転の組合せは多く, 色のパターンは 4000 京通り以上存在する. ルービックキューブは世界的に広く親しまれており, 6 面完成までのタイムを競うスピードキューブという競技も行われている. ルービックキューブにセンシング技術を適用し, 回転を認識することで以下のような応用例が考えられる.

- ルービックキューブの 6 面を完成させるための練習支援
- 回転の種類にそれぞれ文字を対応させた文字入力インターフェース
- オブジェクトを操作するための 3D マウス
- 映像等と連動させたパフォーマンス

上に挙げたような例を実現するシステムを作るためには, まずセンサ等によりルービックキューブの回転を認識し, PC へ情報を送信する必要がある. Park ら [5] は, 画像処理によりルービックキューブの色情報を取得し, 回転を認識している. しかし, スピードキューブ熟練者は 10 回/秒ほどの速さでルービックキューブを回すため, 画像処理による認識では認識時に遅延が発生し, リアルタイムでルービックキューブと映像を連動することは難しい. ホールセンサは, 一般に出力の応答性がよく, 磁石と組み合わせることで, 車輪の回転検出や PC の開閉検出等に用いられている. そこで本研究では, ホールセンサと磁石を市販のルービックキューブに取り付け, 高速な回転でも認識でき

¹ 神戸大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Kobe University

² 科学技術振興機構さきがけ
PRESTO, Japan Science and Technology Agency

a) h.tohnan@stu.kobe-u.ac.jp

b) tsutomu@eedept.kobe-u.ac.jp

c) tuka@kobe-u.ac.jp

るデバイスを提案する。本論文は以下のように構成されている。2章で本研究に関連する研究について述べ、3章では提案手法について説明する。4章で提案システムを実装し、5章では作成したシステムの応用例を挙げる。最後に6章で本論文のまとめを行う。

2. 関連研究

回転角度の測定や画像処理などを用いてルービックキューブの回転を認識する手法については多く研究されている。Lloretら [6] は、3D プリンタで作成したルービックキューブの内部に、無線通信のできるマイコンと、ロータリエンコーダ、方位センサを取り付け、情報を PC へ送信することで回転を認識している。鎌田ら [7] も同様に 3D プリンタでルービックキューブを作成し、ルービックキューブを構成する中央以外の各キューブの内部に LED、フォトトランジスタ、電池、マイコンを搭載し、各キューブ間で信号を受信、送信し合うことでそれぞれの位置を把握している。しかしこれらは、センサやバッテリー、通信デバイスなどをすべて内部に入れるため、本来のルービックキューブのサイズより大きく、同じ感覚で回すのは難しい。特にスピードキューブ熟練者は、ルービックキューブを高速に回すために側面の回転を除き上面や底面を含むほぼ全ての回転は指一本で弾いて行うため、サイズが大きくなることによる回転動作への悪影響が大きい。

また、Bergigら [8] は、ルービックキューブに各面ごとに模様異なる白黒色のステッカーを貼り、画像処理によりステッカーの模様情報を取得することで、回転を認識している。橋塚ら [9] は、画像処理によりルービックキューブの形状と色情報を利用した位置推定を行うことで、手でルービックキューブの一部が隠れている場合でも回転を認識できるシステムを開発している。しかし画像処理を用いた回転の認識手法では、熟練者による高速な回転を認識することはできない。

3. 提案システム

本研究では、ホールセンサと磁石を用いてルービックキューブの回転を認識し、回転情報を PC へ送信するシステムを提案する。

3.1 システム要件

前章で述べたように、画像処理を用いる方法は遅延が発生するため、高速な回転をリアルタイムで認識できない。また、サイズや形状など回しやすさの異なるものは練習に適していないため、実物のルービックキューブを用いた回転認識システムを設計する必要がある。よってシステム要件は以下のようになる。

- 高速な回転の認識が可能である
- 認識の遅延が発生しない



図 1 システム構成



図 2 コーナーのキューブの内部

- 操作感は実物同様である

そこで本研究では、以上の要件を満たしたルービックキューブ型のデバイスを作成する。

3.2 システム設計

システム要件を満たすために、磁界の強さを計測できるホールセンサ、磁石、無線通信のできるマイコンを使用する。ルービックキューブにホールセンサと磁石を取り付け、回転時の磁界の強さを計測することで回転を認識する。また、これらのパーツはキューブを回転させる時に邪魔にならない場所に取り付ける。システム構成を図 1 に示す。マイコンと PC 間の通信は無線通信とし、検出したホールセンサの値に応じてマイコン上で回転面および回転方向を分類し、その情報を PC 側で受信する。内部の構成は図 2 のようになっており、ルービックキューブの構成部品の一部であるコーナーの 8 個のキューブの内部には各面に対して N 極と S 極が逆向きになるように 2 個ずつ合計 6 個の磁石を取り付けてある。さらに、マイコンを装着する柱内部に各面に対してホールセンサを 1 個ずつ取り付けることで、ルービックキューブが回転した際の磁石の通過を検知する。しかし、上面に立つ柱に取り付けられた 4 個のホールセンサだけでは上面と底面の横回転を検出できないため、側面にも 2 個のホールセンサを取り付けた柱を追加することで、全ての面の回転を検出できる。時計回りと反時計回りの判定については、次節にて回転認識手法で述べる。

3.3 回転認識手法

回転認識にはホールセンサの値の変化を利用する。本研究で用いるホールセンサは、磁界の強さによって出力電圧が変化する。磁界が無い場合の基準の出力電圧に対して、

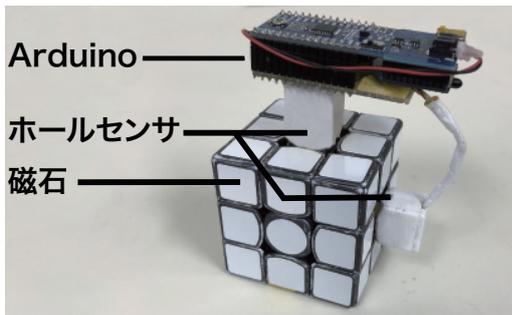


図 3 実装したデバイス

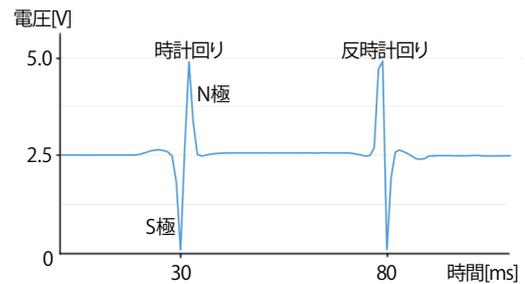


図 8 磁石通過時のホールセンサの電圧値



図 4 PC受信部



図 5 キューブ内の磁石

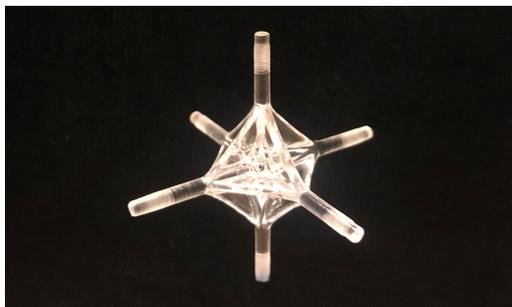


図 6 コアと呼ばれる内部のパーツ



図 7 ルービックキューブの内部と白柱の接続部

N 極が近づくと出力電圧が下がり、S 極が近づくと出力電圧が上がる。よって、N 極→S 極の順で通過した場合と、S 極→N 極の順で通過した場合のセンサ値の変化の違いを利用し、ルービックキューブの時計回りと反時計回りを区別する。

4. 実装

ルービックキューブの回転を認識できるプロトタイプの実装した。実装したデバイスを図 3 に示す。磁石は小型でも強力な磁力を持つネオジウム磁石 (マグファイ

ン社, ネオジウム磁石 ND0155) を使用し、磁界の強さを 1024 段階で計測できるホールセンサ (Allegro Microsystem 社, A1324LUA-T) を用いた。無線通信用マイコンは Arduino Fio であり、無線通信モジュールは XBee を用いた (図 3, 4)。また、ルービックキューブは GAN Cube 社の GAN357 を用いた。コーナーのキューブの内部の面に接着された磁石の一部を図 5 に示す。ルービックキューブの内部には図 6 のようなコアと呼ばれるパーツが入っており、このコアを取り囲むようにコーナーのキューブ 8 個、中央のキューブ 6 個、エッジのキューブ 12 個を取り付けることによってルービックキューブは形成されている。今回実装したデバイスのマイコンおよびホールセンサが付けられている柱は、このコアの頂点に直接接続されているため、キューブを回転しても回転してしまわないようになっている。図 7 は、コアと各キューブの構造が見えやすいように一部のキューブを外したものである。

実際に計測されたホールセンサの値は図 8 のようになった。このように時計回りの場合は S 極→N 極の順でホールセンサを通過するため電圧が下がった後に上がっている。一方で、反時計回りの場合は逆の動きをするので電圧が上がった後に下がっていることが分かる。この電圧変化の違いを利用することで、時計回り、反時計回りを区別して認識できる。スピードキューブ熟練者がプレイする際の早さで回した場合でも認識率は高かった。時計回りの回転を反時計回りの回転と誤認識してしまうことがあったが、これはホールセンサの回転検出の閾値が低いため別の磁石に反応してしまっている可能性や、センサの飛び値によるものが考えられる。PC は Apple 社の MacBook Air (CPU: Core i5, メモリ: 8GB) で、PC 上の認識ソフトウェアの開発は Processing[10] を使用して行った。

5. 回転認識デバイスの応用

本章では、1 章で述べたデバイスの応用例の中から、今回実装した以下の二つについて述べる。

- ルービックキューブの 6 面を完成させるための練習支援
- 回転の種類にそれぞれ文字を対応させた文字入力インターフェース

5.1 ルービックキューブの練習支援アプリケーション

提案デバイスを用いて、ルービックキューブの色を揃えるための手順の暗記を支援するアプリケーションを提案する。

5.1.1 ルービックキューブの練習における問題点

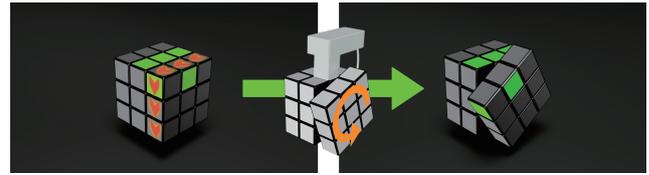
一般にルービックキューブを6面揃えるには、現状の色のパターンに対応する完成への手順を暗記する必要があるが、そのために覚えるべき手順は多く複雑であり、暗記には時間がかかる。色のパターンを細分化して多くの手順を暗記するほど、6面をより早く完成させられる最善の手順を選ぶことができるようになるが、その分暗記量が増えていくため、すべての手順を暗記することは難しく、スピードキューブ熟練者でも覚えていない手順は数多く存在する。そのため多くの者は、いくつかの色のパターンに対する手順のみを暗記し、必ずしも最適でない手順で完成を目指しているという問題点がある。また、ルービックキューブ初心者には、手順の暗記という作業に慣れていないため、なかなか手順を覚えられず途中で投げ出してしまうことが多い。ルービックキューブの手順の暗記には本や動画を用いた方法が一般的だが、本に記されている手順を見ながらの暗記は動きのイメージがつかみにくく、動画を用いた練習では相手が操作した後にプレイヤーが操作するため、相手のペースとプレイヤーのペースが合わず、ストレスを感じやすい。また、これらの方法に共通した問題点として、一度手順を間違えると他の色の配置も崩れてしまい、もう一度同じ状態に戻すまでに時間がかかる点や、手順通りにできた場合も目的の色が揃ってしまうため、連続的な反復練習が行いにくいといった点が挙げられる。

5.1.2 練習支援アプリケーションの実装

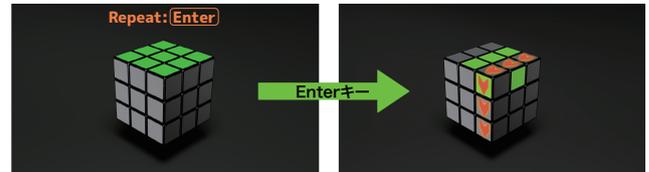
竹川ら [11] は、センシング等を用いた練習支援に関する研究として、シンプルな画像処理によるマーカー検出を用いて奏者の運指をチェックし、運指の間違いをリアルタイムに提示するピアノの練習支援手法を提案している。このように、動きを感知し映像等を使って改善点や誤りを提示するシステムによって、従来の練習では実現できないフィードバックが可能になる。

そこで、前述したルービックキューブの練習時の問題を解決するため、手元のルービックキューブと連動する映像上の特殊な機能をもったルービックキューブによって暗記を支援するアプリケーションを作成する。本論文では、以下のような機能をもったアプリケーションを実装した。

- 手元のルービックキューブデバイスから得られた回転情報をもとに、映像上のルービックキューブも連動してリアルタイムに回転する。
- 練習したい色配置を自由に設定できる
- 次に回すべき回転方向が示されている (図9(a))。
- 色を揃えた後、色の配置が最初の状態に戻り、繰り返し練習できる (図9(b))。



(a) 次に回すべき方向が示される



(b) 色の配置が最初に戻る



(c) サポート非表示時、間違えた方向に回したことを指摘する

図9 アプリケーションの主な機能

- 画面上に示される手順のサポートを任意に表示/非表示できる。
- サポートが非表示の時は、間違えた方向に回転させた時のみ、正しい手順を示す (図9(c))。

なお、映像はPCで表示し、色配置のリセットやサポートの表示/非表示の切り替えなどの操作はPC側で行う。

5.1.3 練習支援アプリケーションの評価

作成した手順の暗記支援システムの効果を評価するための実験を行った。難易度が同レベルの手順を6種類用意し、3種類はデバイスとアプリケーションを用いて暗記する手法 (以下、これを提案手法と呼ぶ) を用いて、残りの3種類は手順が記された図を見て暗記する従来手法で暗記を行った。手順を暗記するために従来手法にて用いた図を図10に示す。色の状態と次に回す方向がルービックキューブに描かれており、その方向に回すと次の図の状態になる。なお従来手法での暗記時は、デバイスではない通常のルービックキューブを使用する。また、提案手法によって暗記している様子を図11に示す。図のように、提案手法を用いる場合では、被験者はルービックキューブ型デバイスを用いて、映像上のルービックキューブを動かしながら暗記する。なお図11での映像上のルービックキューブには次に回す方向が表示されているが、被験者は任意に次に回す方向の表示/非表示をキーボードのsキーを押すことで切り替えられる。また、色を揃え終わったら、Enterキーを

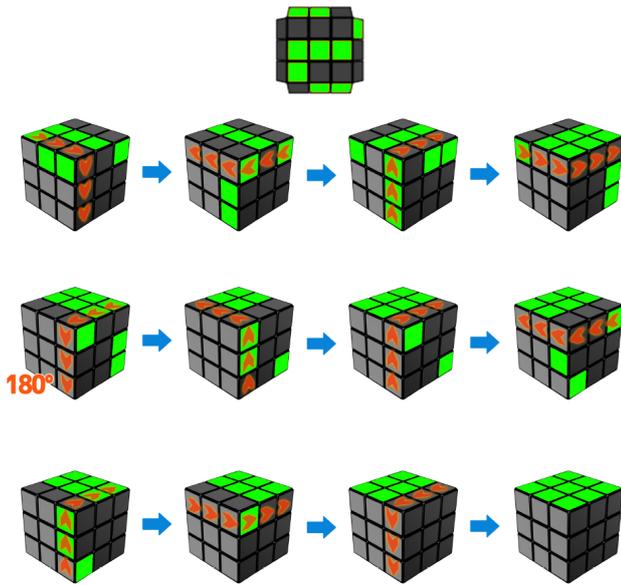


図 10 従来手法での暗記に用いた図

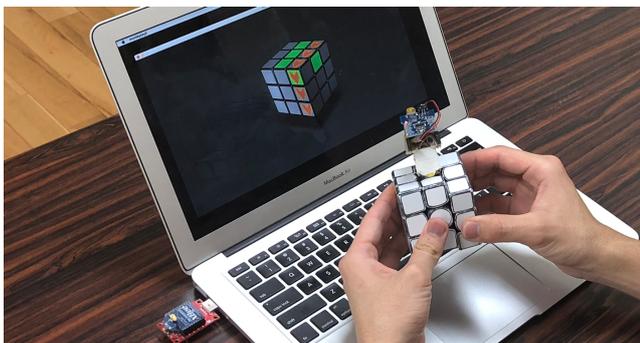


図 11 提案手法で暗記をしている様子

表 1 各被験者の暗記する手順の順番

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目
初心者 A	手順 a	手順 d*	手順 b	手順 e*	手順 c	手順 f*
初心者 B	手順 d*	手順 b	手順 f*	手順 a	手順 e*	手順 c
経験者 C	手順 b	手順 f*	手順 c	手順 d*	手順 a	手順 e*
経験者 D	手順 e*	手順 c	手順 f*	手順 b	手順 d*	手順 a
経験者 E	手順 f*	手順 a	手順 d*	手順 c	手順 e*	手順 b

押すことで色の配置が揃える前の状態に戻る。

被験者は、手順ごとに与えられた手法で暗記し、暗記が完了した時点から5分の間隔をあけてその手順を覚えているかを確認するテストを行う。回数を重ねるごとに手順の暗記に慣れて、暗記の早さや質に差が出る可能性がある。そのため提案手法と従来手法での暗記を交互に行い、初めに提案手法を用いるグループと、初めに従来手法を用いるグループに被験者をあらかじめ分割する(表1)。表1中のアスタリスクが付いている手順 d, e, f は提案手法で暗記する。なお暗記が完了したかどうかは被験者本人に宣言させ、時間的な制限は設けない。確認テストを行う時は、提案手法を用いて暗記した場合でも実物のルービックキューブを用いる。

被験者は21歳~23歳の男性5名で、そのうち3名は自力で6面完成させることができるルービックキューブ経験者である。ルービックキューブ経験者である3名については、実験前に6面完成のタイムを計測する。

実験前に計測したルービックキューブ経験者 C, D, E の6面完成のタイムはそれぞれ1分59秒, 1分11秒, 19秒であった。各被験者の暗記にかかった時間と、5分後のテスト時に回答するまでにかかった時間を測定した結果を表2に示す。表中のアスタリスクが付いている結果は提案手法で暗記したものである。表中に miss と記述されている部分は、回答途中で手順を忘れていたり誤ったりして回答できなかったことを表している。また計測した時間の全体の平均値、各手法ごとの平均値を算出した。初心者 A は、提案手法よりも従来手法で暗記した場合の平均暗記時間が短かったが、テストの回答時間は、すべての場合において提案手法で暗記した方が5秒近く短くなった。初心者 B は提案手法を用いた場合の平均暗記時間がわずかに従来手法を用いた場合よりも短くなったが、テスト時は従来手法で覚えた手順は3種類すべて回答したのに対し、提案手法で覚えた手順は1種類しか回答することができなかった。また、経験者 C は提案手法で覚えた場合、平均暗記時間が約3分短くなった。一方で、テスト時に従来手法で覚えた手順はすべて回答できたのに対し、提案手法で覚えた手順は、1種類は回答できず、もう1種類は途中で間違いに気づいて一回転戻し、手順を思い出してから回答した。経験者 D は、1回目の提案手法での暗記に約20分を要したため、平均暗記時間が約12分であった。また、2, 3回目のテスト時は途中で間違ったため一回転戻す操作を行っていた。4回目のテストでは、途中で手順を忘れたため、思い出すのに時間を要した。経験者 E は、6回すべての試行をそれぞれ比較しても提案手法での暗記時間の方が短かった。テスト時の平均回答時間においても提案手法で暗記した手順の方が早かった。暗記時間および回答時間を手法ごとに比較した場合、提案手法が有効であった場合と逆効果であった場合が同じような割合で存在しているため、この実験結果から提案手法が効果的であったと結論付けることは難しいといえる。

5.2 文字入力アプリケーション

提案システムを文字入力インターフェースとして使用するアプリケーションを実装した。スピードキューブ熟練者であれば、高速にルービックキューブを回転できるため、そのような者が使用するとキーボードよりも早く文字を入力できると考えられる。なお、今回は、日本語のローマ字入力を行うことを目的とした。

5.2.1 文字入力アプリケーションの実装

図12のように、ルービックキューブを回転させると、その回転の種類に対応する文字が入力されるアプリケーショ

表 2 従来手法または提案手法を用いた場合の暗記時間とテスト回答時間

		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目	従来手法平均	提案手法平均	全体平均
初心者 A	暗記時間 (m:s)	07:04	10:49*	05:54	06:01*	06:31	06:37*	06:29	07:49	07:09
	テスト回答時間 (s)	19.9	13.0*	19.2	13.5*	14.5	10.2*	17.9	12.2	15.1
初心者 B	暗記時間 (m:s)	13:18*	12:43	09:09*	09:20	12:59*	14:08	12:03	11:48	11:56
	テスト回答時間 (s)	miss*	17.7	25.6*	20.3	miss*	22.8	20.3	25.6	21.6
経験者 C	暗記時間 (m:s)	09:42	07:34*	11:22	06:18*	07:12	04:56*	09:25	06:16	07:50
	テスト回答時間 (s)	14.7	miss*	15.2	14.2*	11.6	25.4*	13.8	19.8	16.2
経験者 D	暗記時間 (m:s)	20:20*	10:41	06:51*	09:59	10:32*	06:05	08:55	12:34	10:44
	テスト回答時間 (s)	8.4*	8.9	12.4*	47.5	14.8*	13.4	23.3	11.9	17.5
経験者 E	暗記時間 (m:s)	03:53	05:22*	03:46	07:25*	03:57	04:13*	05:40	03:52	04:46
	テスト回答時間 (s)	2.6	4.6*	3.1	4.4*	5.2	3.3*	4.1	3.6	3.9

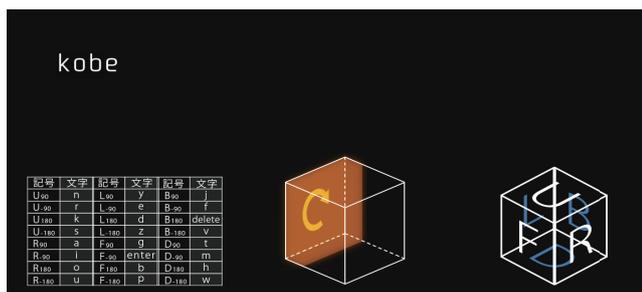


図 12 文字入力アプリケーション画面

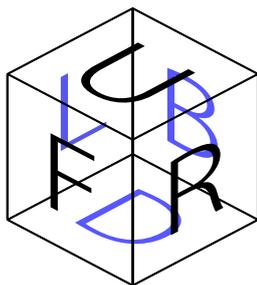


図 13 一般的なルービクキューブの各面の名称

表 3 回転記号とそれに対応する文字または機能

記号	文字	記号	文字	記号	文字
U	n	L	y	B	j
U'	r	L'	e	B'	f
U2	k	L2	d	B2	消去
U'2	s	L'2	z	B'2	v
R	a	F	g	D	t
R'	i	F'	確定	D'	m
R2	o	F2	b	D2	h
R'2	u	F'2	p	D'2	w

ンを実装した。画面の上部に文字が入力され、画面下中央には文字を入力したときにどこをどのように回転したかが表示されている。

なお、回転の種類に対する文字の対応を図 13 と表 3 で示す。ルービクキューブの面には決められたアルファベットが割り当てられており、回転記号「U」は、「U の面がプレイヤーの正面に来るようにルービクキューブを持ったときに時計回りに 90 回転させる」という意味であり、「U'

では反時計回りに 90 度回転、「U2」は時計回りに 180 度回転、「U'2」は反時計回りに 180 度回転させるという意味である [12]。一般に右利きのプレイヤーは、図に示すような R と U の面、すなわち右側面と上面は回しやすいため、使用する頻度が高くなる。よって、これらの回転には日本語のローマ字入力の際に使用される頻度が高い母音などのアルファベットを対応させる。

5.2.2 文字入力アプリケーションの評価

このアプリケーションをルービクキューブ歴 5 年である筆者が使用したところ 3 キー/秒ほどの早さで文字を入力することができた。今の段階ではキーボード入力やフリック入力に比べると十分早いとは言えないが、熟練者であれば、通常のプレー時におけるルービクキューブの回転速度は少なくともキーボード入力の一般的なタイピング速度と同等以上の早さであるので、このデバイスの使用に慣れると将来的にはキーボードやフリック入力と同等もしくはそれ以上の早さで文字を入力できるようになることが期待できる。

6. まとめと今後の課題

本研究では、ルービクキューブの回転を認識するデバイスを作成した。回転を認識するデバイスには、ホールセンサ、磁石およびマイコンが取り付けられており、回転時に磁石がホールセンサを通過した時の値の変化を利用することで回転を認識した。さらに、従来の画像処理等による回転認識手法では難しいルービクキューブ熟練者による高速な回転でも認識することができた。また、作成した回転認識デバイスの活用例として、ルービクキューブの練習を支援するアプリケーションと、デバイスを入力インターフェースとして用いて文字入力を行うためのアプリケーションを実装した。しかし、現段階ではこれらのアプリケーションはあまり有用なものではなかった。今後は、このデバイスの有効な応用例を検討していくとともに、回転認識の誤認識がなくなるようにシステムの精度をあげる。また、デバイスを小型化することで、実物のルービクキューブに近づけることも必要とされる。

参考文献

- [1] 電玉, 電玉: <https://dendama.co.jp/>.
- [2] CEREVO, 7-Magic: <https://7-magic.cerevo.com/ja/>.
- [3] D. Guinness, D. Szafir, and S. K. Kane: GUI Robots: Using Off-the-Shelf Robots as Tangible Input and Output Devices for Unmodified GUI Applications, *Proc. of the 2017 Companion Publication on Designing Interactive Systems (DIS 2017)*, pp. 767–778 (June 2017).
- [4] メガハウス, ルービクキューブ: <http://rubikcube.jp/>.
- [5] J. Park and C. Park: Augmented Reality Based Guidance for Solving Rubik’s Cube Using HMD, *Proc. of International Conference on Human-Computer Interaction 2016 (HCI 2016)*, pp. 524–529 (June 2016).
- [6] J. Lloret and N. Valkanova: Puzzle Facade: A Site-specific Urban Technological Intervention, *Proc. of the 2014 Companion Publication on Designing Interactive Systems (DIS 2014)*, pp. 93–96 (June 2014).
- [7] 鎌田洋平, 笥 康明: ルービクキューブ型デバイスを用いた電子玩具 TangledCube の提案, 情報処理学会シンポジウム論文集, Vol.2010, No.4, pp. 75–78 (Feb. 2010).
- [8] O. Bergig, E. Soreq, N. Hagbi, K. Pevzner, N. Levi, S. Blau, Y. Smelansky and J. El-Sana: Out of the Cube: Augmented Rubik’s Cube, *International Journal of Computer Games Technology (IJCGT 2011)*, Vol. 2011, pp. 1–7 (June 2011).
- [9] 橋塚和典, 神原誠之, 萩田紀博: 拡張現実感によるルービクキューブの解法教示システム, 情報処理学会研究報告, Vol. 2014-CVIM-190, No. 25, pp. 1–6 (Jan. 2014).
- [10] Processing, <http://processing.org/>.
- [11] 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦: 運指認識技術を活用したピアノ演奏学習支援システムの構築, 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 2, pp. 917–927 (Feb. 2011).
- [12] tribox, <http://tribox.com/3x3x3/solution/notation/>.