

スモールアクションコントローラ ～手首の回帰運動を用いたキーボード入力補助システム～

木村智之[†] 松下宗一郎[†]

四肢障がい者が一般的なキーボードを用いた入力を行う際に、2つ以上のキーを同時に押すショートカットキーの操作を補助する腕時計型ワイヤレス運動センサ応用デバイスの検討を行った。キーボード入力におけるホームポジションを基準点とした左手の小さな回帰運動を角速度センサにて取得し、角速度の時間積算による回転角度をベースとした信号処理を行ったところ、障がいの程度が異なる被験者に対し安定したモーション認識を行うことができた。

Small Action Controller

TOMOYUKI KIMURA[†] SOICHIRO MATSUSHITA[†]

We propose a wristwatch-like wireless human interface device for personal computers called a 'small action controller' consisting of a 6-axis motion sensor and a low-power microcontroller. The proposed device helps handicapped people, who have difficulties in forearm movements, to input shortcut keys by using a small alternate rotation of hand while maintaining the home position.

1. はじめに

本研究は、障がいを持つ著者が障がい者としての立場から、従来のパソコン操作システムに代わるシステムの提案ならびに実現を目指したものである。従来のパソコン操作ではマウスとキーボードが併用されているが、日常生活にて電動車いすを必要とするような重度な四肢障がい者にとっては、手をキーボードから完全に離してしまうことが大きな問題であった。そこで、本研究では操作及び着脱が容易な手首装着型のデバイスを考え、比較的小さな手の動きをデバイスに搭載されたモーションセンサにより認識し、パソコンへの情報入力を補助するシステムである「スモールアクションコントローラ」の提案を行っている[1]。

認識の対象とする具体的な手の運動については、高い再現性にて行える、できる限り小さな動きが望ましいことに加え、重度の障がい者にとって負担が少ないという視点から、ひき腕ではない側の肘ならびに手首を支点とした回転（ひねり）運動を中心に検討を行ってきた。そして、手首の内外へひねり運動、手首から先を身体の外側方向にスライドさせる運動、手首から先を持ち上げる運動の3種類を候補とし、加速度3軸、角速度3軸からなる6軸モーションセンサによる運動認識デバイスについて報告を行っている[2]。ここでは、ゼロ点が安定している角速度センサからの信号の時間積算による回転角度の推定をベースとした認識アルゴリズムにより、特定の被験者に対し約80%の認識率を確認できているものの、意図しない身体の動きや回転運動のばらつき等による誤認識等により、必ずしも実用的とは言えないものとなっていた。

そこで本研究では、障がいの程度の異なる被験者につい

て、デバイスの使い勝手についての聞き取り調査とともに、詳細な運動計測を行い、スモールアクションコントローラにおける運動認識アルゴリズムについての検討を行った。そして、パソコン操作において実際に使用される頻度が高い4つのショートカットキーを入力するシステムを試作し、ワープロソフトによる使い勝手の検証を試みている。

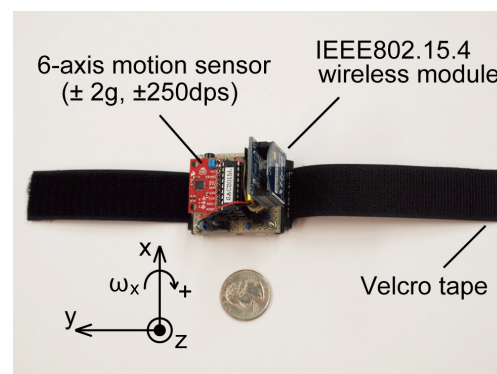


図1 腕時計型ワイヤレス運動認識デバイス
Figure 1 Wristwatch-like wireless motion recognition device

2. スモールアクションコントローラ

図1に本研究にて製作を行った腕時計型デバイスを示す。このデバイスは利用者のひき腕とは反対側の手首に織物テープによって装着するもので、加速度3軸（±2G、周波数帯域 50Hz）、角速度3軸（±250度/秒、周波数帯域 50Hz）からなる6軸運動センサ及び、信号処理と運動認識を行う小型マイクロコントローラ、2.4GHzワイヤレス通信モジュールから構成されている。またデバイスの重量は充電式電池を含めて約43グラムであり、一般的なワープロでの文章入力操作では連続約8時間以上の使用が可能である。

[†] 東京工科大学大学院コンピュータサイエンス専攻
Graduate School, Tokyo University of Technology



図 2 スモールアクションコントローラの実験風景

Figure 2 Experimental Setup for the Small Action Controller

続いて、図 2 は腕時計型デバイスから送信される認識結果をワイヤレスにて受信し、ショートカットキー入力といったキーボード入力操作の信号へと変換するデバイスを USB 経由にて市販のノート PC に接続したシステム全体の様子を示しており、電動車いすを日常的に使用している利用者がパソコン作業を行う際の典型的なセットアップとなっている。ここで、スモールアクションコントローラのシステムを構成している腕時計型デバイスならびに USB 接続デバイスについては、市販のノート PC に何らの改変や新たなソフトウェアの導入を行うことなく動作する設計となっており、簡単にシステムの着脱を行える構成と相まって、実用的な視点からの有用性を高めている。

表 1 手首運動の候補と運動状況

Table 1 Motion symbols and comments from 3 subjects

記号	運動内容	運動状況及び被験者のコメント
O	外ひねり	問題なし(A,C), かなり遅い(B)
O2	外ひねり 2 回	特に問題なし(A,B,C)
Ow	弱い外ひねり	問題なし(A,B), O と区別難(C)
In	内ひねり	やや難(A, C), 体ごと動く(B)
Sl	外スライド	問題なし(A), 手首ひねり有(B,C)
Up	手首持ち上げ	やや難(A, B), 手首ひねり有(C)

3. 障がい者における手首モーションの考察

重度の四肢障がい者においては、一般的なキーボードのホームポジションに手指を置いた状態から比較的自由にキー入力操作を行える範囲は最大でもキー 1 ～ 2 個分以内程度である。また、一度ホームポジションから手指が完全に離れてしまうと、都度ホームポジションへ回帰する動作が必要となるが、身体の可動範囲が極めて狭いことから操作における身体への負担が非常に大きくなってしまふ。さらには、手の運動方向によっては、運動を行うこと自体が困難である場合が多い。そこで、障がいの程度が異なる 3 名

の被験者 A, B, C に、認識の候補となっている 6 種類の運動を行ってもらうことで、運動信号の計測とともに、身体への負荷についての聞き取り調査を行った。ここで、障がいの程度と、手の運動における身体負荷や動きやすさにおける相関関係は必ずしも明確ではないが、手の自由な運動という視点からは、被験者 B に最も大きな困難があり、次いで被験者 C、被験者 A の順に困難の度合いが若干低下しているという印象であった。

各運動の省略記号とともに実験の結果をまとめたものを表 1 に示す。ここで、手首を外側に 2 回ひねる O2 については 3 名の被験者について特に問題が生じていなかった。これに対し、手首の内側へのひねり運動 In では全ての被験者が何らかの困難があったことを述べており、重度の四肢障がい者にとっては身体に負担がかかる動きになっていることが分かった。一方で、ひねり運動における回転量を小さくすることや、ひねりを開始する際の身体の姿勢を工夫することで、負担がかなり軽減されとの意見が被験者 C より得られている。また、Sl と Up については被験者毎の運動様態が大きく異なっていることに加え、運動の強弱やスピードについて迷いがあるとの意見があり、安定した情報入力を行うための運動としては難があることが明らかとなった。以上より、本研究では的確な情報入力を行う運動という視点から O2, O, Ow, In の順に、4 種類の運動に関して更に詳細な検討を行っていくこととした。

表 2 手首ひねり運動の積算回転角度

Table 2 Rotational angle for each motion symbol

Symbol	Rotational Angle (deg.)		
	Subject A	Subject B	Subject C
O	29.5 ± 2.7	50.8 ± 5.3	22.6 ± 2.4
O2	29.1 ± 2.1	44.4 ± 10.6	18.3 ± 2.8
Ow	9.2 ± 2.0	32.6 ± 1.8	23.7 ± 1.7
In	9.5 ± 1.7	21.7 ± 7.0	14.8 ± 4.0

4. 運動認識アルゴリズム

運動認識の対象となる手の動きが手首のひねりによる回転運動を伴う運動となっていることから、図 1 及び図 2 に示す x 軸を中心とした回転角速度 ω_x (dps, degree per second) を時間積算することによって計算した積算回転角度の分析を行うこととした。ここでは、角速度センサのゼロ点が温度変化や経年変化といった要因によって変動することを考慮し、±1dps 以内の角速度が最後に検出された時刻を起点とした角度積算を行っている。表 2 は前出の 3 名の被験者に対し、O2, O, Ow, In の 4 種類の運動をそれぞれ 10 回ずつ、各自が行いやすいと感じるスピードや運動の大きさにて行った際の角度積算値の平均値と標準偏差を示したものであり、被験者ごとに値にやや大きなばらつきが

あることが分かった。また、内ひねり (In) については3人の被験者ともに外側への自然な回転に対して小さな回転角度に留まっており、四肢障がい者にとって実行しにくい動きになっていることが示唆される。一方、弱い外側への手首ひねりである Ow については、被験者 C については回転の積算角度が小さくなっていないが、実験では回転のスピードが落ちているように見えていた。すなわち、被験者 C は「弱い外側ひねり」という運動を「ゆっくりした外側ひねり」として解釈していた可能性があることから、回転に要した時間についても運動を識別する際に参照すべきであると考えられる。次に、表3は各回転運動に要した時間の平均値と標準偏差を示したものであり、被験者 C では外への弱いひねり (Ow) が通常の外ひねり (O) よりも約 50% 程度長い時間を要する運動となっていることが分かる。一方、被験者 C では O2 の運動にて他の被験者よりもかなり速いスピードにて回転運動を行っていることから、Ow の入力ではスピードを緩めることに代えて、回転角度を小さくすることで、O との識別をより容易なものとする事ができるものと思われる。

表 3 手首ひねり運動における回転の所要時間

Table 3 Time duration of rotation for each motion symbol

Symbol	Duration of rotating motion (msec)		
	Subject A	Subject B	Subject C
O	511 ± 77	1057 ± 227	523 ± 78
O2	426 ± 48	713 ± 397	295 ± 66
Ow	440 ± 78	1165 ± 279	773 ± 182
In	509 ± 120	969 ± 346	538 ± 174

表 4 回転運動を認識するルール

Table 4 Recognition rules for the 4 motion symbols

記号	シンボルとして識別されるルール
O	積算角 20 度以上の回転運動対が制限時間内に発生
O2	O の条件の回転が間隔 0.2 秒以内に 2 回連続発生
Ow	積算角 10～20 度の回転運動対が制限時間内に発生
In	逆周りの回転運動対(5 度以上)が制限時間内に発生

続いて、手の運動による情報入力を意図していない状況にて、どの程度の手首回転運動が生じているのかを調べるため、3人の被験者にできる限り自由に一般的なキーボードへの入力動作を行ってもらい、腕時計型デバイスによる運動計測を行った。その結果、積算回転角度にて概ね 5 度を上回るような運動はほとんど検出されず、また回転方向が逆になる回転運動が時間的に近接して生じることは、ほぼ皆無であった。そこで、表4に示すようなルールにて手首ひねり運動の識別を試みることにした。ここで、積算回

転角度の計算を行う際には、回転に要した時間を併せて計算しており、表3の結果から意図的に行われる往復回転運動では、各回転運動 (左回り及び右回り) に要する時間が概ね 0.2 秒から 1.5 秒の間に分布していることから、この範囲を超えた回転運動については運動識別の対象外とした。また、O と O2 の識別では、1 回目の O が行われた後に、2 回目の O が継続して行われているかどうかを確認する必要がある。ここで実験の結果から O2 が入力される場合には全ての被験者について最初の O が行われてから 0.2 秒以内に 2 回目の O が開始されていたことから、間隔 0.2 秒をしきい値として両者の区別を試みた。そして、3名の被験者による運動計測データに対し、数値シミュレーションによる運動認識を試みたところ、各 10 回ずつの入力実験に対し O では全ての運動が正しく識別されていた。しかしながら、被験者 C における O2 については、回転積算角度が他の被験者と比較してかなり小さいことから、Ow として誤認識されるケースが目立った。また、Ow では、主に回転積算角の問題から、回転が大きすぎることで O として認識されてしまうことが被験者 B 及び被験者 C にて散見された。

以上のように、運動の識別結果が被験者にフィードバックされておらず、主観的な判断に頼った手の運動に対するスモールアクションコントローラの運動認識では、正しく認識される確率がそれほど高くはならないことが分かった。この一方で、回転積算角度と回転運動の時間分布を組み合わせた運動識別アルゴリズムでは、PC への入力を意図していない身体の動きを誤認識しているケースが非常に少なく、回転運動の条件を利用者に事前に伝えることで各運動の識別確率を大きく改善することを期待できることから、実際にキーボードショートカットを行える状態でのシステムの検討を試みることにした。

表 5 各運動と対応するショートカットキー

Table 5 Keyboard shortcuts and corresponding motion symbols

Symbol	Corresponding shortcut key	Remarks
O2	Control + Z (Undo)	most frequent
In	Control + S (file Save)	not so critical
Ow	Control + C (Copy)	not so frequent
O	Control + V (Paste)	not so frequent

5. ショートカットキーの割り当て

スモールアクションコントローラによる入力補助では、どのような入力について障がい者の補助を行うのが大きなポイントとなる。また、PC のアプリケーションソフトにて標準的に実装されているショートカットキーに対応することで、本研究によるシステムを利用することのできる場面が増えることから、表5に示す組み合わせを考えた。こ

ここで、最も使用頻度が高く、かつ誤入力の影響を大きく受けるアンドゥ (Undo, 取り消し) については、ここまでの検討から最も安定した識別が期待され、かつ手の運動 (2 回ひねることで、ボディランゲージ的にも否定を表現している) に対する直感的な意味の結びつけが可能であるという視点から、手首の外側への 2 回ひねり (O2) を割り当てることとした。続いて、入力の成否をそれほど厳密に気にしなくとも良いものの、ワープロによる文章の作成中に定期的に行うものとしてファイルの保存 (2 回目以降は上書き保存) に対応するショートカットキー入力の頻度が高いと考え、やや認識率的には難があるものの、他の運動と区別がしやすいという観点から手首の内側へのひねり (In) を配分した。そして、ワープロ作業にて多用される可能性がある文章のコピーとペースト (貼付け) を、残っている 2 つの運動である Ow と O に割り付けることとした。

表 6 運動入力トレーニング前後での積算回転角度の変化
Table 6 Changes in rotational angle after the training experience

Symbol	Rotational Angle (deg.)	
	Before training	After training
O	29.5 ± 2.7	31.6 ± 1.6
O2	29.1 ± 2.1	29.1 ± 1.3
Ow	9.2 ± 2.0	18.3 ± 2.3
In	9.5 ± 1.7	14.9 ± 2.1

6. システムのテストと評価

実際のワープロソフト等を使ったシステムのテストに先立ち、被験者のトレーニングならびに運動による入力識別の精度の確認を行った。ここでは、腕時計型デバイスにより識別した結果を数字に変換してタイピングし、被験者が都度入力内容を確認することができる状況にて、①O, O2, Ow, In の 4 種類の運動を各 10 回ずつ繰り返す、②キーボードにて任意の文章をタイピングしながらランダムに O, O2, Ow, In のいずれかの運動を行う、といった手順にて、被験者 A について実験を行った。その結果、当初は回転角度の大小関係等にて若干の試行錯誤があったものの、10 分以内程度の短い時間にてほぼ 100% の運動識別率が達成された。また、①の各運動を 10 回ずつ行う実験では、実際に識別結果が表示される環境でのトレーニングが行われた結果、表 6 に示すような積算回転角度分布の変化が生じている。すなわち、トレーニング前では被験者 A では Ow の回転角度が小さすぎて識別されないことがあったことから、トレーニング後では Ow と O のしきい値境界線付近である 20 度付近にまで Ow における回転角度が増加している。また、どの位の運動にて確実な識別がなされるのかを体験したことにより、積算回転角度のばらつきが相対的に小さく

なっていることが分かった。

以上により、4 つの手首ひねり運動の識別がほぼ確実に行えるようになったことから、より実際のワープロ入力作業をモチーフとしたタスクテストを実施することとした。このタスクテストでは、

- 1) キーボード (ローマ字かな変換) で「あいうえお」と入力する
- 2) 1) で入力した文字列を選択し、これをコピーする
- 3) コピーした文字列を 6 回ペーストする
- 4) 最後にペーストした 1 回が誤りであったという想定で、アンドゥを 1 回行う
- 5) ファイルの一時保存を行う

という一連の手順について、スモールアクションコントローラを使用した場合と、使用しなかった場合について入力に要する時間の計測を行った。それぞれの場合について、各 3 回ずつの入力テストを行った結果、スモールアクションコントローラを使用しなかった場合では平均 28.5 秒を要したのに対し、使用した場合には平均 23.4 秒となり、約 20% 程度の時間短縮となっていた。また、スモールアクションコントローラにおける運動の認識では、Ow (コピーコマンド) が若干識別されにくかった場面があったものの、誤認識は発生していなかった。一方、被験者の手首に設置したモーションキャプチャ装置による位置計測の結果、スモールアクションコントローラを使用しなかった場合では手指をホームポジションへ戻す際に明確なタイムロスがあったのに対し、使用した際には 1~2 ミリメートル程度以内の範囲にて手が元の位置に回帰していることが分かった。

7. 結論と今後の課題

重度の四肢障がいにより、健常者と同様なキーボード入力を行うことが困難である利用者に向けて、手首に装着する小型軽量の運動認識デバイスと、ワイヤレスにてキーボード入力を行う受信デバイスを組み合わせたスモールアクションコントローラの検討を行った。その結果、手の小さな回転運動を判別することで、キーボードのホームポジションからできるだけ手指が離れてしまうことのないショートカットキー入力補助システムを実現することができた。今後は、より幅広い被験者に対し、システムの有用性の検討ならびに運動認識の確実性の向上を図って行くことで、低コストで気軽に利用することのできる障がい者向けキーボード入力補助システムの普及を目指して行きたい。

参考文献

- 1) 木村智之, 松下宗一郎, 他: スモールアクションコントローラ, インタラクション 2013, 発表番号 IEXB-28, 2013 年 2 月 (東京).
- 2) 木村智之, 松下宗一郎: スモールアクションコントローラ~手の移動量を最小にする障がい者向け入力補助デバイス~, インタラクション 2015, 発表番号 A46, 2015 年 3 月 (東京)