工作機械作業における動作の認識*

—ジャイロ兼加速度センサおよびDPマッチングを用いたシステム—

加 藤 秀 雄** 森 堅 太 郎*** 劉 雪 然†

Human Motion Recognition in Machine Tool Operation
—System Using Gyro/Acceleration Sensor and DP Matching—

Hideo KATO, Kentaro MORI and LIU Xueran

Skilled human operators can adjust various conditions of manufacturing system and deal with unexpected troubles flexibly and appropriately. However, the operators can possibly fail the adjustment and dealing at times, because of fatigue, carelessness, bad physical condition, etc. The failure may cause some serious delay of the manufacturing processes and even physical danger to the operators. So, an intelligent system for avoiding the failure or warning its signs is desired to improve their working environment. To develop the system, a reliable recognition technique of operator's motion is indispensable. In this research, the recognition system of five kinds of motion in cylindrical grinding machine operation has been investigated by utilizing a small gyro/acceleration sensor and DP matching method. The similarity between the reference motion (standard pattern) and an input motion has been evaluated by the index of DP matching, or the pattern distance. The reference motions have been derived by averaging several typical motion data after time normalization. As the result, to recognize the objective five motions, first, the similarity indices by only angle data should be compared each other. Then, the similarity indices by only acceleration data should be compared, if necessary.

Key words : human motion recognition, manual machine tool operation, gyro/acceleration sensor, DP matching, similarity index

1. 緒 言

生産工程における熟練技能者の役割は、自動化の進歩とともに廃れるどころか、ますます高まっている。一方、優れた感性でその能力を発揮する技能者も人間である以上、錯誤を犯し、その結果、工程を遅延させ、場合によっては肉体的危険にさらされることがある。錯誤防止策としては古くからフェイルセーフやフルブーフ機構等が考えられてきた。しかし、それらによる安全性の確保は操作性や作業能率をしばしば低下させることになり、熟練技能者からは嫌われる傾向にある。フェイルセーフ機構等を用いずとも、もし技能者の動作パターンから生理的心理的不安定を推定し、危険な状態に移行しないように警告する、あるいは錯誤を犯したとしても軽微な錯誤状態でとどめることができれば、安全性と操作性を両立できると考えられる。このようなシステムを構築するにはまず作業動作の検出および認識が行えなければならない。

一方、人間の動作認識については、人間と機械とのコミュニケーション手段や人工現実感に関連して多くの研究が行われている^{1)~3)}。しかし、生産工程における機械操作の動作認識に直ちに適用できるものはほとんどない。本研究では、精密工作機械を操作する技能者に対する動作認識システムの開発を目標に、その第一段階としてレバーおよびハンドル車操作の認識方法について検討する。

2. 装 置

2.1 対象動作とその検出

認識の対象とする動作は、図1に示す円筒研削盤（豊田工機

GOS30x50）作業における右手による心押台レバー操作、砥石台送りハンドル車操作および砥石台早送りレバー操作とした。これらの操作はいずれも正方向と逆方向があるが、早送りレバー操作では図中に示す方向のみを対象とした。レバー操作はレバー先端の球を握って両死点間を動かすものとし、ハンドル車操作は取手を握って、取手が真上にある状態から約1回転するものとした。また、操作に要する時間はいずれも2~3 sとし、通常の研削盤作業でしばしば見られるような速度を対象とした。以上のように本研究での認識対象動作は5種類であり、以下ではこれらを図中に示すA、B、L、R、Uの記号で表す。

さて、これらのレバー等の操作状態は、それらの軸に回転センサ等をつければ検出が可能であるが、ある操作から別の操作へ移る際の“つなぎ”の動作を検出することはできない。また、ビデオカメラを用いる方法はこのような動作を検出できるが、カメラ台数が少ない場合、死角の存在は避けられない。本論文では“つなぎ”の動作を認識対象としないが、本研究の最

Fig.1 Objective motions to be recognized

* 原稿受付 平成10年5月20日

** 正 会 員 千葉大学工学部（千葉市稲毛区弥生町1-33）

*** オムロンライフサイエンス研究所（京都市右京区山ノ内山ノ下町24）

† 元千葉大学大学院

Fig.2 Hand motion detecting apparatus

Fig.3 Grip sensor

Fig.4 Segmentation of motion signal

終目的である人間の錯誤の警告あるいは防止システムではその認識は不可欠であり、それへの拡張が可能なものでなければならない。そこで本研究では、操作する人間の手先の動きを簡便な方法で検出し、その信号から上記の5種類の動作のいずれであるかを認識するためのシステムの構築を図る。そのための検出器としては小形軽量のジャイロ兼加速度センサを用いることとした。

Table 1 Specifications of gyro/acceleration sensor

Size of sensor unit	34 mm × 34 mm × 32 mm
Weight of sensor unit	40g
Output interval of measuring data	0.1s
Measuring range of angle	
Pitch	-90°— +90°
Roll and yaw	-180°— +180°
Resolution of angle	0.2°
Measurement error of angle	
Roll and pitch	±10%±1.5°(for -30°— +30°)
Yaw	10%
Maximum angular velocity	±350°/s
Maximum acceleration	±19.6 m/s ²
Resolution of acceleration	0.098 m/s ²
Measurement error of acceleration	±10%±0.48 m/s ²

(a) Change of angle in operation A

(b) Change of acceleration in operation L

Fig.5 Time normalization by DP matching

2.2 動作認識の方法

使用したジャイロ兼加速度センサは3軸まわりの回転角度と3軸方向の加速度を検出できる日本航空電子製JIMS-30S型であ

Table 2 Similarity between 10 motion signals (Operation A)

Data	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	Sum
#1	0	11.2	8.7	7.3	11.7	11.3	4.9	8.8	8.7	5.3	77.9
#2	11.2	0	5.1	5.6	7.4	6.2	11	16	7.3	7.3	77
#3	8.7	5.1	0	2.8	4.1	4.3	7.3	12.7	4.8	5	54.7
#4	7.3	5.6	2.8	0	4	4.7	7.3	12	4.2	3.2	51
#5	11.7	7.4	4.1	4	0	6.4	9.4	13.9	5.8	7.5	70.1
#6	11.3	6.2	4.3	4.7	6.4	0	9.2	12.1	8.1	7.1	69.8
#7	4.9	11	7.3	7.3	9.4	9.2	0	6.9	6.8	5.9	68.8
#8	8.8	16	12.7	12	13.9	12.1	6.9	0	11.8	9.5	103.7
#9	8.7	7.3	4.8	4.2	5.8	8.1	6.8	11.8	0	3.5	61
#10	5.3	7.3	5	3.2	7.5	7.1	5.9	9.5	3.5	0	54.3

Fig.6 Standard pattern for operation A (Angle data)

り、その主な仕様を表1に示す。このセンサを、手袋を介して右手の甲に図2に示すように取り付けた。その出力はRS-232C (9600bps) を経由して0.1sごとに計算機に取り込まれる。センサ出力は前述の5種類の動作中に対応する部分を切り出して動作認識に供することとなる。動作中はいずれもレバー等を握っているから、握り状態の有無を検出すれば前述のデータの切り出しを行うことができる。指の動きのセンサとしてはデータグローブ等がよく知られているが、本研究では手の平側に取り付けた簡易把握センサにより行った。その構造は図3に示すように2枚の鋼板と直流電源からなり、鋼板の接触の有無により握り状態を判別する。動作Aにおけるジャイロ兼加速度センサと把握センサの出力波形の例を図4に示す。図中に示すように本研究では把握センサの出力が2Vを超えている場合を把握状態と見なし、その期間に対応するジャイロ出力すなわち角度出力および加速度出力を切り出して、動作認識に供した。

動作認識には音声認識等と同様に時間軸の非線形伸縮による正規化を必要とするので、そのような目的のために広く用いられているDPマッチング法⁴⁾を適用した。図5(a)に、動作Aの場合の角度変化の生データと、後述の標準波形に対するDPマッチングにより得た時間正規化後の波形データの2例を示す。また、図5(b)に、動作Lの場合の加速度変化の生データと、同様に時間正規化後の波形データの2例を示す。これらの

図から、時間正規化により値の急変する箇所の時刻がほぼ一致していることがわかる。なお、図中のデータ番号は後出の図7～9のそれらに対応している。

2.3 標準波形

さて、認識における基準となるデータ、すなわち標準波形にはその動作における最も平均的でもノイズの少ないデータを採用する必要がある。本研究では、一つの動作をあらかじめ10回繰り返したときの測定データから表2に示すような表を作成することにより標準波形を定めた。すなわち、表2の最左欄と最上欄の番号は動作Aを10回繰り返したときの角度データの番号であり、内側部分の数値はデータ間のDPマッチング評価値（パターン間距離）すなわち類似度を示す。例えば、#3と#5のデータの類似度は4.1である。同じ#3同志の類似度が零であることからわかるように値が小さいほど類似していることを示す。この場合の類似度の単位は $^{\circ}$ である。表2の最右欄の値はその行の10個の類似度の和、すなわち一つのデータと他のすべてのデータとの類似度の和を示す。この場合、和の値が最小になっているデータは10個のデータのなかで最も代表的なものと言うことができ、この場合は最小値が51の#4ということになる。このデータをそのまま標準波形とすることも可能ではあるが、ノイズが含まれたままである。そこで、ノイズを除去するために、表2において和の値が小さいほうから5番目までのデータすなわち#4、#10、#3、#9、#7を平均して標準波形とした。平均をとる際には、#4の時間軸を基準にして他のデータの時間軸をDPマッチングにより正規化している。図6(a)は表2における#4のデータを示し、(b)は上述の平均したデータを示す。平均することにより急峻な変化が抑制されてしまうが、ノイズと思われる細かい変化は平滑化されていることがわかる。

なお、一つの動作に対する角度と加速度の標準波形は別個に算出しており、加速度の標準波形の算出手順も同様である。また、4名の被験者に対して標準波形の算出を行ったが、被験者による差異はほとんど認められなかった。

3. 認識実験の結果と考察

前節で述べた手順に従って5種類の動作に対する角度と加速度の標準波形を定め、各被験者に対して改めて各動作を10回繰り返させたときの認識実験を行った。なお、実験結果において被験者間の差異は標準波形算出の場合と同様にほとんど認められなかったため、以下では1名によるもののみを示す。

図7, 8, 9は各動作を行ったときのセンサ出力データ（以下、入力波形と呼ぶ）と標準波形とのDPマッチング評価値すなわち類似度を示す。例えば図7(a)において、左側にある10本の黒い棒グラフは10回の動作Aの入力波形と動作Aの標準波形との類似度を、右隣の10本の網掛けした棒グラフは同じ10回の動作Aの入力波形と動作Bの標準波形との類似度を示す。入力波形のデータ番号は左から右に向かって#1, #2の順である。

図7は、角度データのみを用いた場合の類似度を示す。図からわかるように、ほとんどの入力波形において対応する標準波

Fig.7 Motion recognition by using only angle data

形との類似度が最も小さくなっている。すなわち、入力波形が動作Aである図7(a)では、動作Aの標準波形との類似度が他の動作の標準波形との類似度より小さくなっており、図7(b)~(e)も同様である。従って、この類似度を用いることにより5者択一式の認識がほぼ可能であるといえる。しかし、図7(d), (e)からわかるように入力動作L, Rの場合は対応する標準波形と他と

Fig.8 Motion recognition by using only acceleration data

の類似度の差はかなり小さく、認識を誤る恐れがある。

図8は、加速度データのみを用いた場合の類似度を示す。この場合の類似度の単位は加速度の単位となる。図からわかるように、動作A, Bの場合、認識はほとんど不可能である。しかし、動作L, Rの場合、図7に比較して図8の方が最小類似度と第2位との差が大きく、認識の精度が高いと考えられる。動作

Fig.9 Motion recognition by using both angle and acceleration data

L, Rの認識に角度より加速度データの方が適しているのは、ハンドルの回転方向が異なっても右手の向きの変化はほとんど同じであるのに対して、加速度成分間の位相変化は回転方向によってほぼ対称になるためである。他方、加速度データのみで動作A, Bの識別が難しいのは、ばねを用いたスナップ動作機構による大きな加速度変化が存在し、最大加速度のばらつきが極めて大きいためである。なお、図5(b)に示すように、動作L, Rの入力においても最大加速度の違いが認められ、これが加速度データを用いても認識精度の大幅な向上に至らない理由の一つである。最大加速度のばらつきの影響を減少させる一つの方法として加速度の大きさを最大加速度で正規化する方法が考えられるが、ノイズを拡大してしまう場合があり、精度の向上方法として必ずしも適当とはいえない⁵⁾。また、動作L, Rと同様に回転方向が異なる動作A, Bの識別を角度データのみで行えるのは、前述のスナップ動作により角度変化に差異が生じるためである。

図9は、角度と加速度データの両方を用いた場合の類似度を示す。縦軸の単位を記載していないが、この場合の類似度は角度（単位： $^{\circ}$ ）と加速度（単位： m/s^2 ）の和となる。結果は図7の場合とほぼ同様であり、5者択一式の認識はおおむね可能であるが、動作L, Rに対する認識はやはり誤る恐れがある。類似度の算出において角度より加速度データの重みを大きくする方法も試行したが、認識精度向上への効果は少なかった。従って、5種類の動作を精度よく認識するためには、まず角度データのみの類似度により識別し、それが動作LまたはRであった場合、さらに加速度データのみの類似度によりどちらであるかを識別するのが適当であると言える。

4. 結 言

円筒研削盤作業における五つのレバーまたはハンドル車操作の認識システムについて検討した。その結果、得られた主な結論は以下のように要約される。

- (1) 作業者の手につけたジャイロ兼加速度センサの出力信号とあらかじめ定めた標準波形に対してDPマッチングを行い、その評価値を類似度として動作認識を行うシステムを開発した。
- (2) 複数回の試行動作におけるセンサ出力データに対して、相互のDPマッチング評価値の和から代表的な幾つかのデータを選択し、時間正規化後、平均することによりノイズの少ない標準波形を導くことができた。
- (3) 対象とした5種類の動作の認識は、まず角度データのみの類似度により識別し、それがハンドル車回転動作であった場合、さらに加速度データのみの類似度によりどちらの回転方向の動作であるかを識別するのが精度の点から適当である。

おわりに、本研究の遂行に多大な協力および貴重な意見をいただいた卒業研究学生 掛谷正嗣君、鎌ヶ迫始君、塩倉雄平君および楊友沈助手に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 高橋勝彦, 関 進, 小島 浩, 岡 隆一: ジェスチャー動画像のスポットニング認識, 電子情報通信学会論文誌D-II, J77-D-II, 8 (1994) 1552.
- 2) 中嶋正之, 柴 広有: 仮想現実世界構築のための指の動きの検出法, 電子情報通信学会論文誌D-II, J77-D-II, 8 (1994) 1562.
- 3) 牛田博英, 山口 亨, 高木友博: ファジー連想記憶システムを用いた動作認識, 電子情報通信学会論文誌D-II, J77-D-II, 8 (1994) 1571.
- 4) 例えば, 迫江博昭, 千葉成美: 動的計画法を利用した音声の時間正規化に基づく連続単語認識, 日本音響学会誌, 27, 9 (1971) 483, または, 古井貞照: デジタル音声処理, 東海大学出版会, (1985) 162 など.
- 5) 森 堅太郎, 加藤秀雄: 加速度センサによる工作機械作業の動作認識, 1995年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1995) 135.