

相対座標を用いた運動指導システム

黒田 修平^{†1} 放地 宏佳^{†1} 吉見 真聡^{†1} 吉永 努^{†1} 入江 英嗣^{†1}

概要: 人が新しく運動を学ぼうとする際, 自分だけで正しいフォームを習熟するのは困難である. そこで本研究では, 人間の関節座標を取得可能なデバイスによりユーザの運動の流れを検出し, 自動的に運動の正しさを判定して指導するシステムを開発する. システムに人間の運動を認識させるために, 相対チェックポイントを用いる. これは正しい運動を行う上で関節座標がとるべき相対的な位置関係を表しており, それが連続で達成されることで正しい運動が達成されたか否かを判定する. 本論文では運動の例としてラジオ体操を用いる. ラジオ体操には体の伸び, ひねり, 反らしの他, リズムよく運動することが求められる. そこで提案手法はユーザにラジオ体操の音楽に合わせて運動を行わせ, もしユーザが相対チェックポイント群を制限時間以内に達成できなければ, 運動をやり直させる. こうしてユーザが運動を達成可能になるまで指導し, 正しい運動の習得を促す. 本システムにて人々に練習をさせた結果, 7名中6名がチェックポイント達成率を運動の練習前と比較して向上させることができるようになった.

Exercise Instruction Applications using Relative Coordinates

SHUHEI KURODA^{†1} HIROYOSHI HOUCHI^{†1} MASATO YOSHIMI^{†1} TSUTOMU YOSHINAGA^{†1}
HIDETSUGU IRIE^{†1}

1. はじめに

人が新しく運動を学ぼうとする際, 自分だけで運動の正しいフォームを習熟するのは困難である. 理由として, 自分の運動フォームを客観的に把握することが難しいことや, 実際の体の動きを調べながら運動することが難しいことがあげられる. そのため一般的に人は, トレーナーや熟練者など, その運動に精通した者へ協力を依頼し, 正しく運動できているか, どうすれば正しい運動ができるかを指導してもらう. しかし, 他者に協力を求める際には, 外部要因の制約により自由な時間に気軽に学ぶことができず, 結果として運動を学ぶ機会が妨げられる.

本研究は人間の運動を自動的に捉え, その運動に適切な指導を与えることで, 誰もが一人で運動の習熟が可能なシステムを開発する. 人間の運動を捉えるため, 本研究では

人間の関節座標を取得することのできるデバイスを用いて全身の関節座標を取得し, その座標データを PC 上に渡す. この座標データを検証することにより人間の運動の成否を判定し, システムが次に行うべき運動をユーザに提示することで運動指導を行う.

2. 関連研究

2.1 モーションキャプチャの研究

Colvin らは, 米国海兵隊の戦場トレーニングシミュレーションプログラムを構築するために有効なモーションキャプチャデバイスの検討を行っている [1]. シミュレーションプログラムの要求定義として, 手や腕を用いたジェスチャーを読み取れることや, 銃や兵士の頭の向きを読み取ること, また, 座標取得のためのデバイスを兵士に取り付けないなどといった項目を定義している. それに加え, 光源に対するロバスト性や, リアルタイム性, デバイスの耐久性なども指標の一部として, 有用なモーションキャプチャデバイスの検討を行なっている. Colvin によれば, 圧力センサーとジャイロ스코ープを用いたモーションキャプチャ

^{†1} 現在, 電気通信大学大学院 情報システム学研究科 情報ネットワークシステム学専攻 ネットワークコンピューティング学講座 吉永・入江研究室
Presently with The University of Electro-Communications Graduate School of Information Systems Department of Information Network Systems Laboratory for Network Computing / Yoshinaga and Irie Lab.

は、腕の骨格の構成や、空間のどこに腕があるかを正確に把握できるものの、無線通信の技術的要求が高く、高価であると述べられている。また指先 LED や AR タグ、加えてテレビカメラを利用したモーションキャプチャは、LED とマーカーをカメラで撮影することで人間の手や腕、肘、胴体などを追跡することができるものの、ユーザへのマーカー装着・設置に手間がかかることや、劣悪な照明環境の下ではタグ検出が難しく、そのうえジェスチャー追跡のために多くの計算機資源や電力を割く必要があるとされている。それに対して Kinect と Prime Sense Software を用いたモーションキャプチャは、ユーザの行動を制限するものを装備する必要がなく、デバイス自体の耐久性もあり、しかもユーザの位置を赤外線によってキャプチャしているため、可視光の少ない低照度条件でも運用できることから、最も有効な手法であると述べられている。

2.2 チェックポイントを用いた運動認識

Chaves らは、人間が運動する際に関節が通る付近の一定範囲をチェックポイントとして設定することで運動の判定を行っている [2]。まず、判定したい運動を単位時間ごとに分解し、それぞれの時間で取るべき関節座標の集合をチェックポイントとして定義する。次にチェックポイントとして設定された特定の座標と、ユーザの現時刻における関節座標との位置関係を計算し、一定の範囲内に収まっていれば、その時点での運動姿勢が正しいと判断する。さらに、複数のチェックポイントを一定時間内に連続して達成し続けることにより、運動が再現されたと認識する。また、運動の構成する要素として設定されたチェックポイントの途中から始めても、チェックポイントを満たす順番が正しければ同一の運動として判断する。運動の認識率を調べた実験では、チェックポイントの許容範囲、運動するスピード、計測する関節の数をそれぞれ変えつつ、肩のみを動かして腕を曲げない運動と、手・肘・肩をそれぞれ曲げる運動を行っている。実験の結果、64.5 % から 100 % の運動認識率を得たと述べている。しかしながら、手・肘・肩をそれぞれ曲げるなど、複雑な運動である場合においては認識率が 30 % 減少したとも示されている。

3. 提案手法

3.1 相対チェックポイント

絶対座標を用いた運動認識では、あらかじめ設定された特定の体格の人間に合わせた運動の成否判定が可能である。しかしながら体格は人それぞれ異なるため、例えば腕の長いユーザにとっては簡単に到達可能なチェックポイントであっても、腕の短いユーザには到達が難しいチェックポイントとなるおそれがある。また、腕の短いユーザが無理にチェックポイントへ腕を伸ばしても、そのユーザの体格に合った正しい運動ができるようになったとは言えない。

い。この場合、正しい運動の成否判定を行うためにはユーザごとにパーソナライズする必要が生じてしまう。

そこで本研究では、ユーザの関節間の相対的な位置関係を、運動の成果判定のチェックポイントとして用いる(以下、相対チェックポイント)。例えば、右手の Y 座標が頭の Y 座標を越えたとき、右手が挙げられたと判断するような仕組みである。

システムはユーザの関節座標をデバイスで取得し、達成すべき相対チェックポイントと照らし合わせ、比較すべきひとつあるいは複数の関節座標同士のどちらが上か下か、あるいは右か左かを判定することで、ユーザが相対チェックポイントを達成しているか否かを判定する(図 1)。相対チェックポイントはユーザの関節座標の相対的な位置のみで表されるため、成否に体格差の有無は関わらない。これにより、誰もが同一の設定で運動の成否を判定することができるようになる。また、相対チェックポイントは、運動を構成する特徴的な関節の種類とその位置関係を条件として設定され、それが連続で通過されることで運動が行われたと認識する。つまり運動は、相対チェックポイントの群によって構成されることになる。

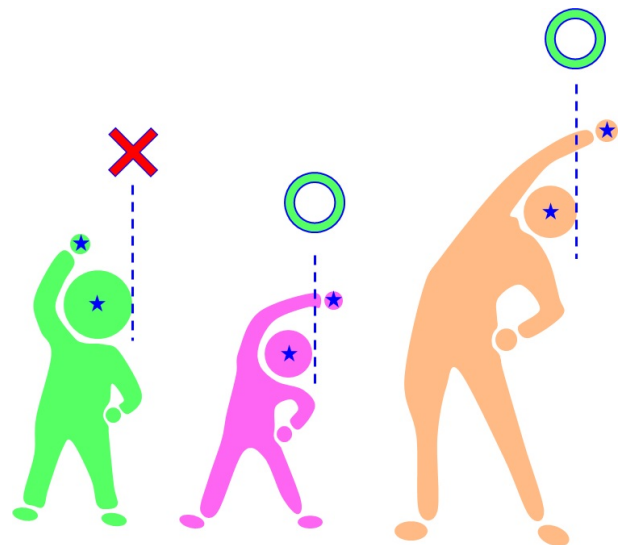


図 1 相対座標による運動の判定

3.2 制限時間による運動のやり直し機能

ユーザへの運動指導への手段として、正確な運動ができるまで反復練習をする方法がある。もしユーザが運動を誤り、システムから指導されたとしても、その指導がユーザの身に付かないまま次の運動を開始してしまったとき、加えて別の運動の誤りが起きるなどして直さなければならない箇所が積み重なり、結局運動の上達が遅れてしまう。一方で誤った運動を行ってしまったユーザに対し、ミスした相対チェックポイントの達成条件のみを指導し、ユーザが

その部分のみを直しても運動の上達には結びつかない。熟練した運動とは相対チェックポイントをひとつひとつ独立して達成するものではなく、運動を構成する相対チェックポイント群を滑らかに達成し続けるべきものだからである。

そこで、ユーザに運動のどこをどう直せばもっと上達するかを覚えてもらうため、ユーザはシステムが定めた制限時間以内にひとつの運動を構成する相対チェックポイント群をすべて達成することができなければ、該当する運動の相対チェックポイント通過記録を全てクリアし、その運動を最初からやり直しとさせる。こうすることでユーザに相対チェックポイントを達成する術だけでなく、運動の流れそのものを体得させる。このとき運動の指導画面もすべて途中からのものとさせる。このように、システムが定める相対チェックポイント群を良いスピードで達成できるまで何度もやり直しさせつつ、達成のための指導を繰り返すことで、ユーザの運動習熟度を向上させる。

3.3 関節座標取得デバイスと、座標誤検知の制御

ユーザが相対チェックポイントを達成できているか否かを判定するためには、ユーザの関節座標を取得する必要がある。ここではそのためのデバイスとして Kinect を用いる。Kinect は RGB カメラと赤外線センサーを元にしてユーザの全身を撮影し、20 個の関節座標を取得することが可能である（図 2）。

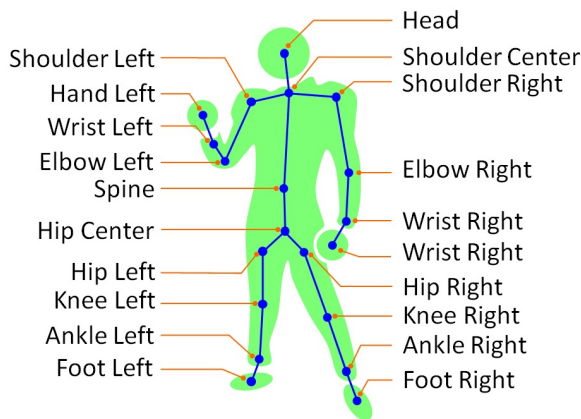


図 2 Kinect が取得する関節座標の種類

こうして取得した各関節座標を元に、相対チェックポイントを元にして比較し、ユーザが正しい運動を行えているか否かを評価する。

ただし Kinect はユーザの関節が端末の前方に見えていなければ関節座標を取得できないため、関節が体の別の部位に隠れてしまうと頻繁に関節座標を見失ってしまう。加えて、端末自体による関節座標の誤検知もあり、相対チェックポイント達成がなされたかどうかの判定に誤りが生じる。例えば表 1 はシステムが運動する被験者を捉え、その姿勢が腕を振る運動においてどの相対チェックポイン

トと一致しているかを返した様子を表したものである。被験者は 6181ms から 6650ms まで、腕を振る運動における Pose1 の相対チェックポイントを達成するような姿勢を維持し続けているにもかかわらず、一部、どの相対チェックポイントも満たしていないことを表す state = 0 が返ってきている部分がある。これは Kinect から見て両腕の関節が肩やひじと重なってしまった結果、関節座標を誤検知してしまったものと考えられる。

表 1 関節座標誤検知による相対チェックポイント判定のゆらぎ

Head.Y	HandR.Y	HandL.Y	Spine.Y	state	T(ms)
0.33669	-0.08086	-0.13714	-0.19069	1	6181
0.33658	0.03256	-0.08330	-0.18588	1	6212
0.33549	0.08067	0.02180	-0.18533	1	6251
0.33590	0.09752	0.04154	-0.18462	1	6282
0.33593	0.10461	0.10314	-0.18134	1	6313
0.33686	-0.01972	0.12260	-0.19173	1	6349
0.33990	0.03218	0.12297	-0.19226	0	6387
0.33938	0.03573	0.12636	-0.19271	0	6418
0.33924	-0.00994	0.12616	-0.19307	1	6450
0.34006	-0.03163	0.12326	-0.19440	1	6483
0.34017	-0.05543	0.10841	-0.19595	1	6518
0.34331	-0.03913	-0.03980	-0.19109	0	6550
0.34219	-0.02640	-0.04389	-0.18867	0	6583
0.34188	-0.08017	-0.07611	-0.18607	1	6613
0.34123	-0.07608	-0.16470	-0.18600	1	6650

このような関節の重なりによる誤検知を制御するため、本システムでは過去の直近フレームにおける全身分の関節座標を複数保管しておく。現在の相対チェックポイントを達成しているかを現フレームの相対座標で調べるだけでなく、過去 10 フレーム内でも相対チェックポイントが指し示す関節座標同士を比較する。そして、現在と過去を合わせた相対チェックポイント達成の数が、システムの保持している直近フレーム数の過半数を超えていれば、相対チェックポイントは満たされたと判断する。こうして関節座標の一時的な誤検知を補間することにより、誤った運動をしているにも関わらず関節座標の誤検知により正しい運動と見なされ、次の運動へ進めてしまう危険性を減らす。

4. システム構成

本システムは、PC と接続した Kinect の前でユーザが運動することによって稼働する。Kinect が撮影できる範囲を図 3 にて表す。

システムとしては、起動時、図 4 のように、PC 画面上にはユーザを指導するための指導画面がウィンドウとして表示される。このときは指導画面に何も表示されていない。その他、RGB カメラで撮影した様子と、同じくカメラの撮影の様子が映っているのに加えて右上にボタンが表示されたウィンドウがポップアップされる。このとき、ユーザ

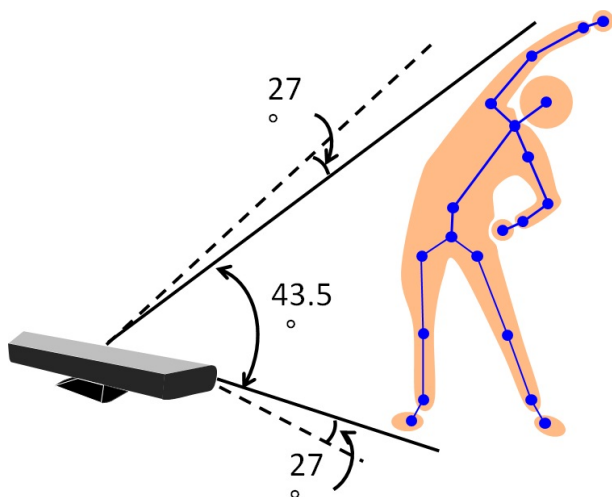


図 3 Kinect の撮影範囲

が画面右上のボタンが表示されている位置へ手を伸ばし、空間上でボタンを押すような動作をすると、まず、システムが起動してからの時間を計測するストップウォッチが起動する。その後、システムフロー（図 5）が起動し、ユーザの関節座標の取得が開始される。これはシステムが停止するまで継続される。

システムフローにおけるループについて説明する。この関節座標は取得されると順次、キューに格納されていく。指導画面上には次に満たすべき相対チェックポイントの図や、こういったポーズを取ればよいといった文章による指導が表示される（図 6）。続けてシステムはキューに格納された関節情報を元に、現在達成すべき相対チェックポイントの示す条件と比較する。もし条件を満たすようであれば、次のポーズに必要な相対チェックポイントが呼び出される。また、次に行うべき相対チェックポイントの図と、それを文章により表した指導が表示されるようになる。もしその運動内でもうやるべき相対チェックポイントがなくなってしまった場合は、その運動の代わりに新しく次に行うべき運動が呼び出され、その運動を達成するための新しい相対チェックポイントが呼び出される。

ただしストップウォッチが計測している時間を見て、もう次の運動に移るべきタイムリミットになっても運動内の相対チェックポイント群がすべて達成されていない場合、その運動で今まで通過してきた相対チェックポイント群の通過履歴をクリアし、ストップウォッチの時間を運動開始時に巻き戻して最初から運動をやり直す。

5. 評価実験

5.1 評価項目

本システムは「ユーザから取得した関節座標を相対的に観測することにより、体格差のある人間の運動でも的確に指導することができる」、かつ「本システムをユーザが利用

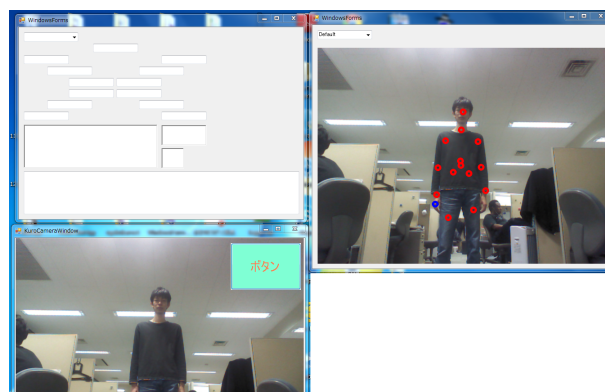


図 4 初期起動画面

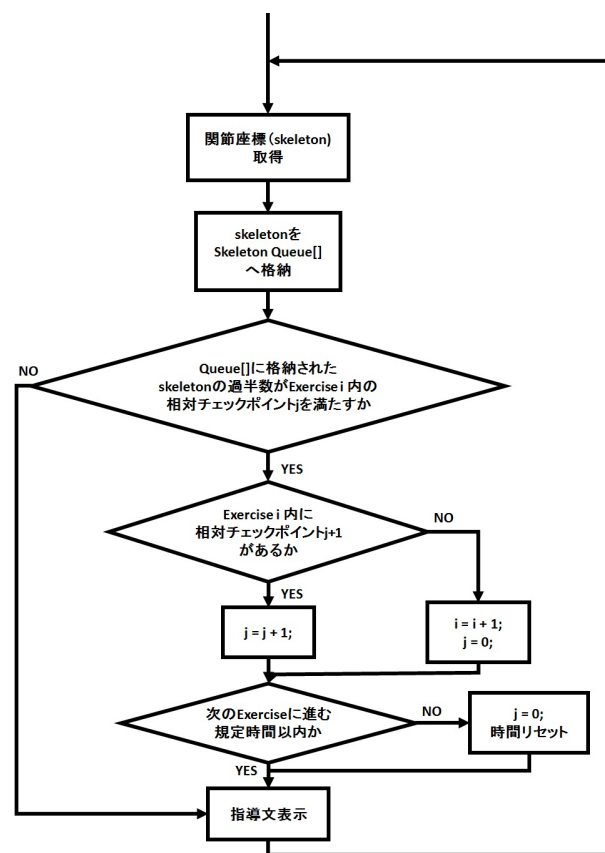


図 5 システムフローチャート

することで、ユーザの運動を指導し、運動習熟度を向上させる」ことが狙いである。これらが提案により満たされているかどうかを評価するために、以下の項目を評価する必要がある。

- (1) 様々な体格をしたユーザへの対応
- (2) ユーザの運動習熟度の向上

なお、実験環境を表 2 に示す。

5.2 実験準備・ラジオ体操の実装

実験を行うためには運動を実装する必要がある。ここでは、運動の例のひとつとして、ラジオ体操を実装した。ラジオ体操における相対チェックポイントは、ラジオ体操指

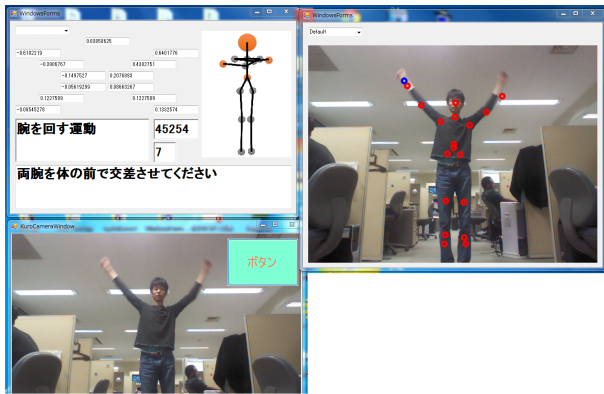


図 6 システム起動状態の画面

表 2 実験環境

OS	Windows7 Professional
ROM	350GB
RAM	8GB
CPU	2.40GHz Corei7-2760QM
Sensor	Kinect for Windows L6M-0005

導本 [3] にあるポーズの画像と、その体操を上達させるために記述してあるアドバイスを元に設定した。

例えばラジオ体操の最初の運動である伸びの運動を判定するには、

- Pose1
 - ・右手が体幹より右にある
 - ・右手が体幹より下にある
 - ・左手が体幹より左にある
 - ・左手が体幹より下にある
- Pose2
 - ・右ひじが頭より右にある
 - ・右ひじが頭より上にある
 - ・左ひじが頭より左にある
 - ・左ひじが頭より上にある
- Pose3
 - ・右手が体幹より右にある
 - ・右手が頭より下にあり、かつ体幹より上にある
 - ・左手が体幹より左にある
 - ・左手が頭より下にあり、かつ体幹より上にある

という 3 つの相対チェックポイントを順番通りに達成する必要がある。なお、今回はラジオ体操の背伸びの運動から順番に沿って、胸をそらす運動までの合計 4 つの体操 (図 7~10) についての実装を行った。

5.3 様々な体格をしたユーザへの対応

提案手法が様々な体格のユーザに対応しているかを調べ

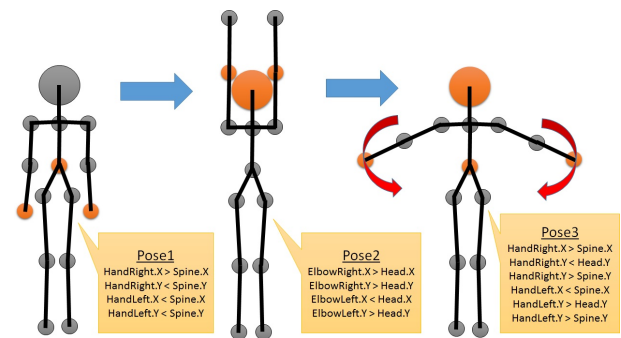


図 7 伸びの運動の条件

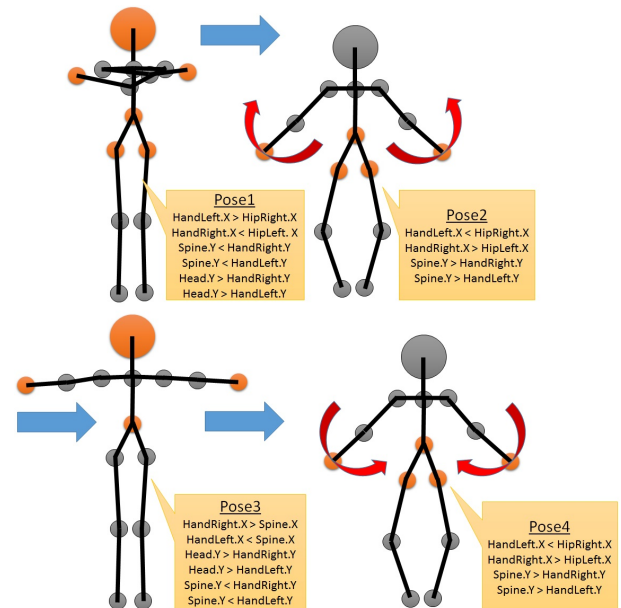


図 8 腕を振る運動の条件

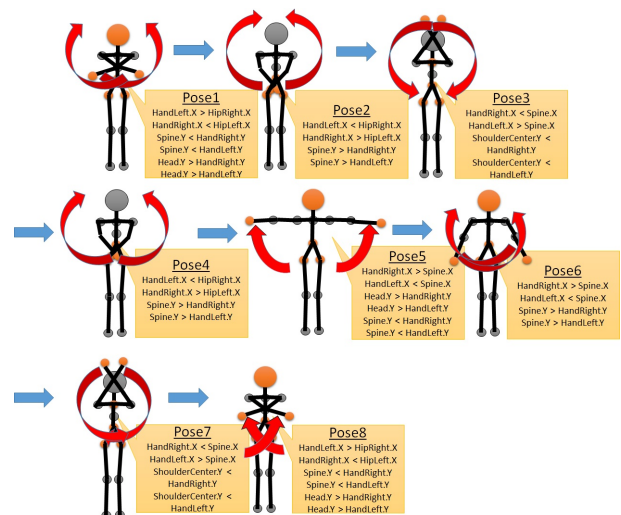


図 9 腕を回す運動の条件

るため、148cm と 170cm の 2 名の被験者に本システムを用いて体操をしてもらい、被験者が全ての相対チェックポイントを達成できるかを実験した。

被験者がどのような過程で相対チェックポイントを達成したかを表 3 にて表す。

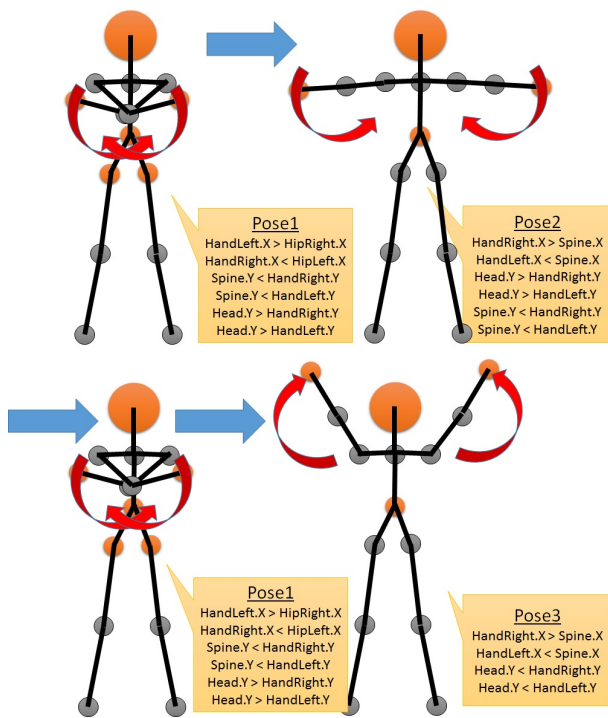


図 10 胸を反らす運動の条件

表 3 やり直しが起こった相対チェックポイントの箇所

被験者 A	148cm			
回数	exercise1	exercise2	exercise3	exercise4
1 回目		24,8,25	25,17,25,26	
2 回目		29	23,14,22,10,18	
3 回目		26	30,25,26,25,18	
4 回目				3,3,7,3,9
5 回目				達成
被験者 B	170cm			
回数	exercise1	exercise2	exercise3	exercise4
1 回目		18,29		7, 達成

結果、2 名とも設定された相対チェックポイントを全種類達成することができた。

5.4 ユーザの運動習熟度の向上

ユーザの運動習熟度の向上は、本システムを利用することにより、ユーザがより多くのチェックポイントを達成できるようになったか否かで評価する。そのため、被験者には以下の実験（図 11）を行ってもらった。

1. 本システムを用いて、カメラの前で曲に合わせてラジオ体操を行ってもらう。このとき、制限時間超過のミスによるやり直し機能を使わない。
2. ラジオ体操終了後、出力されたログを見て、体操ひとつひとつがどの相対チェックポイントで止まったかを確認する。
3. やり直し機能をオンにした本システムによって、5 回ミスが起こるまで練習する。
4. 1. を計 3 回行うまで、1. からもう一度行う。

実験には 7 名の被験者に参加してもらい、評価実験の過

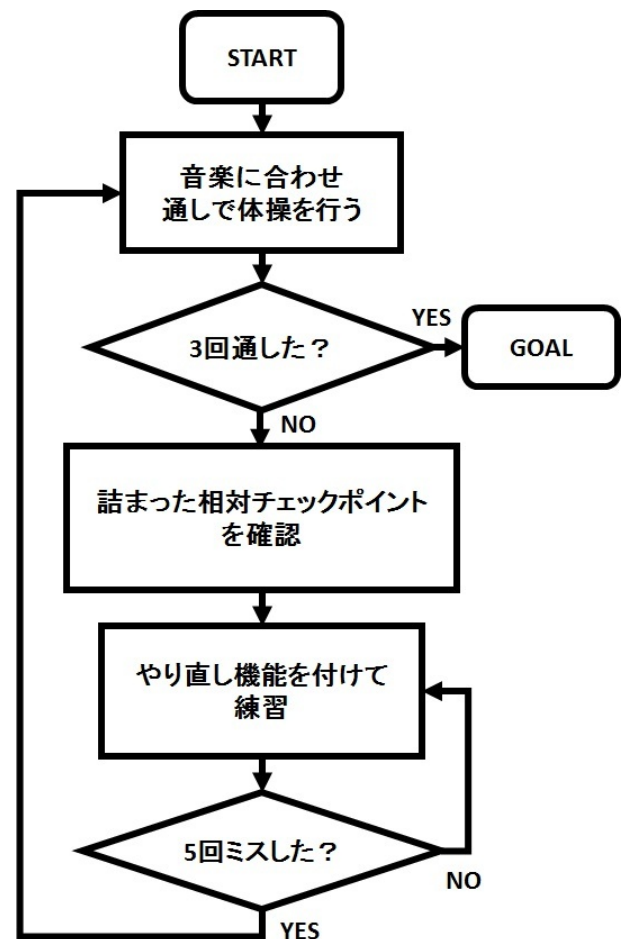


図 11 評価実験フローチャート

程口で達成された相対チェックポイント数が全体の何%であったかを調べた。その結果得られたデータを元に、図 12～18 にまとめた。

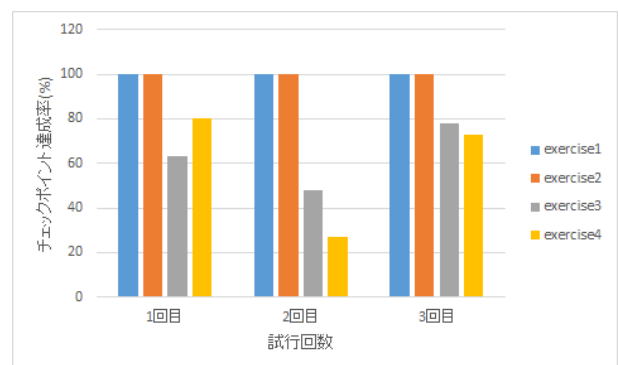


図 12 被験者 1 のチェックポイント達成率の推移

実験結果より、体格の違う 2 人でも相対チェックポイントを最後まで達成することができたことから、本システムはユーザの体格差によらない運動指導をすることが示せた。

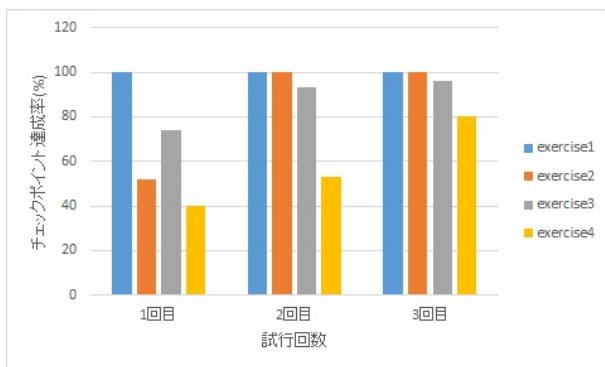


図 13 被験者 2 のチェックポイント達成率の推移

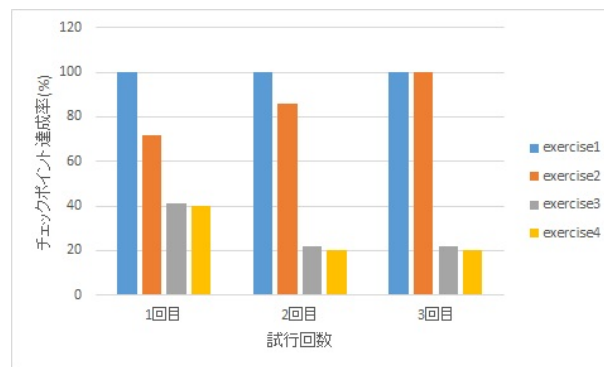


図 17 被験者 6 のチェックポイント達成率の推移

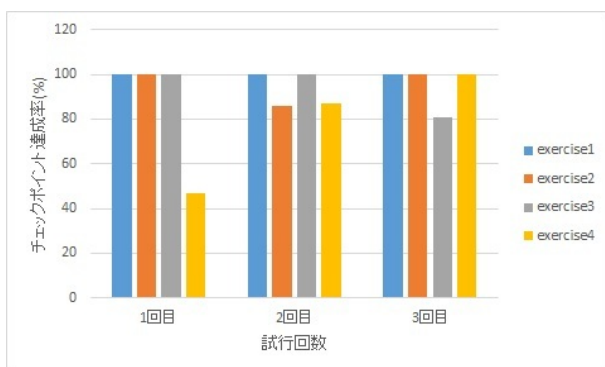


図 14 被験者 3 のチェックポイント達成率の推移

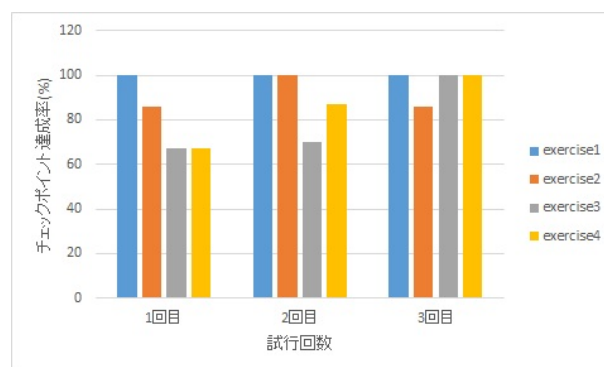


図 18 被験者 7 のチェックポイント達成率の推移

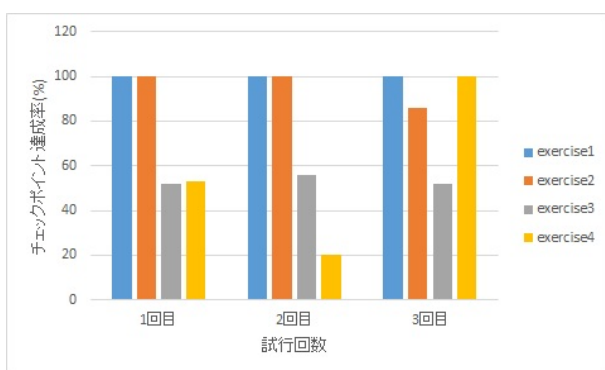


図 15 被験者 4 のチェックポイント達成率の推移

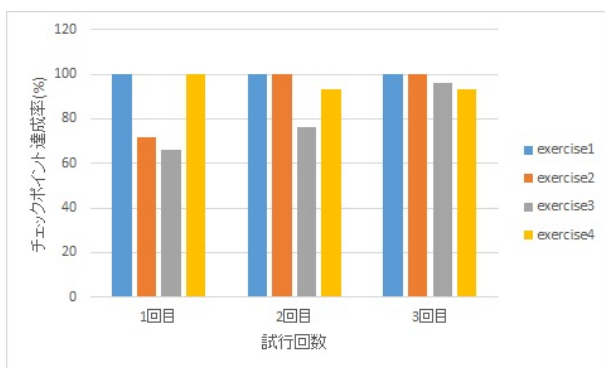


図 16 被験者 5 のチェックポイント達成率の推移

5.5 ユーザの習熟度の向上

図 12～18 より、伸びの運動は全員 100 % の達成率であ

る。腕を振る運動はほぼ全ての被験者が高い達成率を誇っており、1 回目の達成率が低かった被験者も 3 回目には達成率の上昇が見られた。腕を回す運動と胸を反らす運動については、達成率を上げることができた被験者と伸び悩んだ被験者ではっきり分かれた。この 2 つの運動のみに共通する動きは腕を上にあげることであることと、実験後の聞き取りの結果、一部の者にとって腕を上にあげる行為が難しく、現状のチェックポイントを達成できないことが判明した。

またすべての被験者において、4 つのうちいずれかの体操のチェックポイント達成率は 1 回目の試行結果よりも 3 回目の試行結果の方が良くなったという結果を得た。被験者の中には 1 回目の試行結果より 2 回目の試行結果の方が達成率が低い者がいるが、実験後の聞き取りによると、どうすればもっと良い結果が出せるのか試行錯誤した結果こうなったという意見があった。2 回目に達成率が落ち込んだ被験者の 3 回目の試行結果を見ると、腕を上にあげる運動以外は達成率が上がっているので、達成率の一時的な下降は運動を上達する過程の中で必要なことであるといえる。

5.6 実験を通した総括

以上の検証から、本システムについて以下の事が考察される。

- 体格の大小に限らず、様々な体格のユーザへ対応することができる。

- 時間超過の場合のやり直し機能により，ユーザの何らかの運動の習熟度向上をはかることができる．ただし，一部どうしても上達できない運動が存在する．また一時的に達成率が下がることもあるが，上達できないと考えられる運動以外なら確実に上達する．

6. まとめ

本研究では，一人で運動を上達するために関節座標を用いた運動指導システムを構築した．また，様々な体格のユーザに対応するために運動達成の条件を相対座標からなるチェックポイントにて設定した．これにより，あらゆる体格のユーザへラジオ体操の運動習熟度向上を促すことができるようになった．

また現システムにおいて，運動のリズム感についての指導としては時間超過によるやり直しのみなので，逆に運動のスピードが速すぎて正しいとは言えないような運動に関してもやり直しを求めるなど，適切な指導が行えるようにしていく．

今回は現システムを利用することによる運動習熟度の向上を評価するため，全体の相対チェックポイント数から通過した数の割合を測定したが，今後は相対チェックポイント通過を判定するだけでなく，相対チェックポイントを満たした上でどれだけ体が伸びているかなど，どれだけ美しい運動ができているかを採点形式で表すことで，より詳しく運動を指導し，ユーザの運動習熟度向上をはかる．

さらに，特定の運動の熟練者から取得した，運動の手本となる関節座標の軌跡データから相対チェックポイント条件を自動抽出する技術を開発し，他の運動についても評価を行っていく．

参考文献

- [1] Charles E. Colvin +, "Multiple User Motion Capture and Systems Engineering", Proceedings of the 2011 IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium, University of Virginia, Charlottesville, VA, USA, April 29, 2011
- [2] Thiago Chaves +, "Human Body Motion and Gestures Recognition Based on Checkpoints", Virtual and Augmented Reality 2012 14th Symposium, 28-31 May 2012
- [3] 湯浅景元, "図解 本当はすごい「ラジオ体操」健康法", 中経出版 2007