マン・マシンインターフェースとしての オーケストラシステムの開発

久保田大和[†1]　ピトヨ　ハルトノ[†2]

概要：人間は，日常的に様々な機械を専用のインターフェースを用いて操作する．しかし，操作の直感性に欠けるインターフェースも多い．その原因として，人間と機械間のインタラクションと人間間のインタラクションを区別して設計しているからであると考える．本研究では，人間間で行われるノンバーバルなコミュニケーションを人間と機械間に模倣したシステムを提案する．ここでは，オーケストラの指揮者と演奏者の間で行われるインタラクションを視線とジェスチャによるインターフェースを用いて模倣し，システムを構築した．人間間で行われるコミュニケーションを反映させることで，より直感的な機械操作を実現させることができると考える．本稿では，オーケストラシステムの構成と予備的なユーザ実験の結果について報告する．

1. はじめに

昨今，産業分野に限らず，日常的な場面においても IoT デバイスが普及しており，人間と機械のインタラクションが増加している．人間が機械を操作するうえで最も重要なことは操作上の直感性である．近年，音声を通じて自然言語によるインターフェースが増えており，Amazon 社が開発した Amazon Alexa が搭載されたスピーカーは，音声指示を用いて機器を操作することができる．このように，人間が日常的に使う言語を用いて機械に指示ができ，より直感的な機械操作を実現した．しかし，人間は言語の他にアイコンタクトやジェスチャといったノンバーバルなコミュニケーションも日常的に行い，それらに着目しした非言語モダリティを実装したインターフェースの研究が盛んに行われている．特に視線インターフェースに関する研究は，「見る」といった単純な動作から直感的な操作が期待され，様々な手法が提案されている．

ここで，視線を用いたインターフェースの研究の例として，小林らによる視覚スイッチシステム[1]がある．この研究では，人間間で行われるアイコンタクトに着目して，人間が操作対象となる機械に一定時間視線を送り，機械側がそれを捉えることでインタラクションが開始される．これは，人間間のアイコンタクトを模倣したものである．人間間で行われるアイコンタクトは，様々な情報を伝達，受命するために行う．視覚スイッチシステムでは，機械を対象としたアイコンタクトにより，操作指示の伝達，機械側は，指示の受命を再現することができ，人間間で行われるものと遜色ないコミュニケーションを可能とした．しかし，現段階の視覚スイッチシステムは，人間間のアイコンタクトを模倣することに成功したが，二値制御のみに限定し，多機能を有した機械に対して，満足に扱うことができない．ここで，視覚スイッチシステムにジェスチャ操作を追加することで，操作性の幅を拡張し，一人のユーザが多数の機械に対して，満足に性能を活かした機械操作ができる手法を検討する．

本研究では一対多のノンバーバルなコミュニケーションの例としてオーケストラに着目する．オーケストラのメンバーは，様々な特色や価値観，性格を持った，十人十色な集団であり，指揮者は，基本的な知識と技術の他，思考，感情，感覚，直感の 4 つの気質を高いレベルで身につけ，独自に作品を解釈し，数多くの表現の引き出しを使いながら，集団における演奏を仕上げていく．指揮者不在の集団での演奏も可能であるが，あくまでもそれは譜面通りの演奏ができるレベルであり，表現の豊かさに欠ける．優秀なコンサートマスターが楽器隊を先導して，演奏を行うコンサートもあるが，コンサートマスター自身も身振りと目の動きを駆使してリードを行い，数多の演奏者と共に演奏を仕上げる．このように，オーケストラでは高次元なノンバーバルなコミュニケーションを行って複雑な演奏を可能としている．本研究では，オーケストラのノンバーバルなコミュニケーションを視覚スイッチシステムによる視線インターフェースとジェスチャインターフェースの 2 つの非言語モダリティのみを用いたインターフェースを組み合わせることで再現し，直感的な機械操作を可能とする新たなインターフェースの開発を試みる．

2. 関連研究

ジェスチャを用いた関連研究は過去に多数提案された．

渡邊ら[2]は，加速度センサを用いたジェスチャ認識における連続動作の認識手法として，Scalable PRImitive for Next-Generation Graphs(SPRING)というアルゴリズムを改良し，ジ

†1 中京大学　工学研究科
Graduate School of Engineering Chukyo University
†2 中京大学　工学部
School of Engineering Chukyo University

© 2025 Information Processing Society of Japan.

ェスチャの前後に学習していない動作が含まれる場合や，間隔を開けずにジェスチャを連続して行った場合でも高精度にジェスチャ認識が可能なアルゴリズムを提案した．渡邊らが改良した SPRING というアルゴリズムは，部分的に動的伸縮法（DTW: Dynamic Time Warping）を用いており，加速度から成る時系列信号を用いてジェスチャの認識を行っている．しかし，認識に若干の遅延が生じてしまうといった問題点があった．本研究では，リアルタイムでのジェスチャ認識が必要であるため，DTW の派生である DDTW(Derivative-Dynamic Time Warping)[3]を用いて，入力された加速度から成る時系列信号とテンプレートとして保存された時系列信号の類似度の計算を行い，ジェスチャ認識を行う．

Mei-Hua Lee[4]らは，侵襲的及び，非侵襲的なブレインマシンインターフェースの重大なリスクや欠点を指摘した上で，先天的に上肢と下肢の両方が欠損している 10 歳の男児に対し，ワイヤレス慣性測定ユニット（IMU：Inertial Measurement Unit）に基づいたボディマシンインターフェースを使用し，上半身の動き（肩甲骨の挙動の組み合わせ）のみでカーソルの位置を制御させる実験を行った．実験結果では，男児はインターフェースの性能を急速に生かすことができ，1 回の実験でパフォーマンス力がほぼプラトーに達するという結果を得た．このように短期間で，身体動作に基づくインターフェースを使いこなすことができる根底には，直感性が関係しており，ユーザ自身の身体の一部をインターフェースに介在させることで，より直感的な機械操作を行える可能性があるといえる．本研究においても，視線と指揮棒を振るといったジェスチャ（腕の動き）を介在させているため，直感的な機械操作が期待できると考える．しかし，Mei-Hua Lee らの開発したインターフェースは，福祉的なサポートの面においては有効的であるが，使用環境等に制限があるため，実用化は難しいと考える．本研究では，インターフェースを用いる際の機器は着脱が容易であり，様々な場面で柔軟に用いることができる．

3. オーケストラシステムの構成

図 1 より，本システムでは，まず視覚スイッチシステムを用いて，ユーザの視線による操作対象の選択を行う．そして，確定された操作対象に対して，ジェスチャ操作として，指揮棒を振り，操作指示を伝達する．このように伝達された操作指示に応じて，操作対象は実行する．実行後は，同一の操作対象に新たな操作指示の伝達，もしくは操作対象の変更が可能となり，新たな操作対象に対しても同様にジェスチャ操作を行うことで操作指示の伝達が可能となる．この一連の流れをリアルタイムで行い，機械操作を行う．

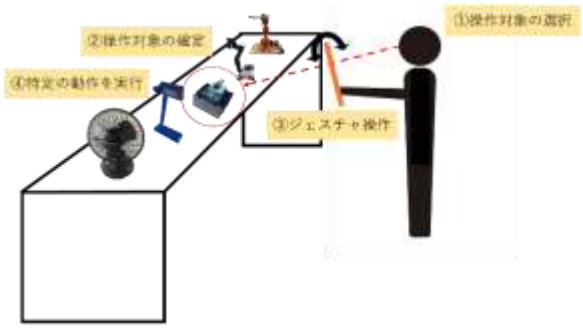

図 1　本システムによるインタラクションの概念

本システムの構成を以下の図 2 に示す．本システムでは，物体認識を行うためにメガネの中央部に小型カメラを装着した．ジェスチャ操作で用いる指揮棒の先端には三軸加速度センサを取り付けている．

図 2　オーケストラシステムの構成

3.1 視覚スイッチシステム

まず，本システムの操作対象の選択をするために，視覚スイッチシステム[1]を用いる．視覚スイッチシステムでは，5 つの機械の物体認識を行うニューラルネットワークを実装した小型計算機 Jetson Xavier NX（以降 PC）に小型カメラを接続し，メガネに取り付けることで人間の視覚を捉える．小型カメラからユーザが捉えた画像を PC に送信し，画像内の物体を予め学習したニューラルネットワークによって識別する．本システムを使用するユーザの注視する対象物がカメラ画像の中央に収まることを確認したら，その物体を操作対象として認識する．つまり，ここでは人間の視線が操作対象を選択するためのスイッチとして用いる．

3.2 ジェスチャ操作

ジェスチャ操作では，指揮棒を振ることにより，視覚スイッチシステムで確定した操作対象を 4 つの動作に操作することができる．図 2 より，本システムで用いる指揮棒は，マイクロプロセッサ Arduino と三軸加速度センサから構成され，連続的に加速度の値を PC に送信する．

指揮棒の振り方は，本システムを使用するユーザの直感性を反映させるためにユーザ独自の振り方を考えてもらう．しかし，時間や状況によって，同じ動作をしているつもりで

© 2025 Information Processing Society of Japan.

も振り方に差異が生じてしまうといった問題点があるため，本システムのジェスチャ操作では，まずテンプレートとなる時系列信号を PC に保存し，入力された時系列信号と保存された時系列信号の類似度を DDTW で計算する．

DDTW とは，2 つの時系列信号の類似度を計算するアルゴリズムの 1 つであり，$X = x_1, x_2, \ldots, x_M (x_i \in R, 1 \leq i \leq M)$と$Y = y_1, y_2, \ldots, y_N (y_j \in R, 1 \leq j \leq M)$の 2 つの時系列信号があるとき，式（1）を用いて各時系列信号を変換する．

$$x_i' = \frac{(x_i - x_{i-1}) + \left(\frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2}\right)}{2} \tag{1}$$

式 (1) で変換した時系列信号をX'とし，Yに対しても同様に変換したものをY'とする．X'のある時刻$t = w^{X'}$，Y'のある時刻$t = w^{Y'}$としたとき，X'とY'の各要素間の距離が小さくなるようにアライメントすることを$w = (w^{X'}, w^{Y'})$と表し，時系列信号のアライメント全体をK個の対応関係の集合Wとする．

$$W = \{w_1, w_2, \ldots, w_K\} \tag{2}$$

$w_k = (w_k^{X'}, w_k^{Y'})$としたとき，式 (3) を用いて DDTW による類似度の計算を行う．

$$DDTW(X', Y') = min \sum_{k=1}^{K} \left| X'_{w_k^{X'}} - Y'_{w_k^{Y'}} \right| \tag{3}$$

このように DDTW では，時系列信号同士の形状に着目した類似度を計算できるため，本システムのジェスチャ操作に採用した．

以下にジェスチャ操作の概要を図 3 に示す．

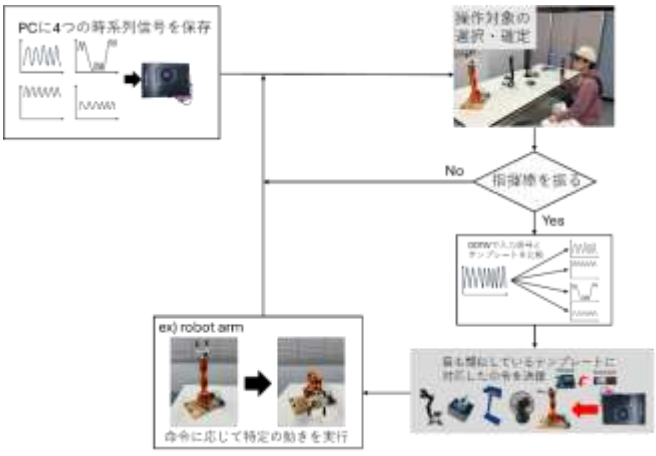

図 3　ジェスチャ操作の概要

図 3 より，先ずシステムを使用する前にユーザには，4 つの振り方を決定させ，加速度からなる 4 つの時系列信号のテンプレートを保存する．このとき，各々のテンプレートは，操作対象の各動作と対応している．そして，視覚スイッチシステムで操作対象を確定させた後に事前に決定した振り方のいずれかで指揮棒を振ることで，入力された時系列信号と保存していた 4 つのテンプレートのそれぞれを DDTW で類似度を計算する．入力された時系列信号と最も類似しているテンプレートに対応した動作になるように PC から操作対象に操作指示を送信し，それに応じて操作対象は特定の動作を実行する．また，操作対象の変更をする際には，指揮棒を振らずに静止状態を保つことで，ジェスチャ操作が終了され，再び視覚スイッチシステムを用いた操作対象の選択と確定を行う．

4. 実験

本実験では，オーケストラシステムの動作実験と本システムとは，別のシステムを用いた比較実験を 21 歳から 24 歳の大学院生 5 名と学部生 7 名の男子学生を対象に行った．内大学院生 2 名は，過去に視覚スイッチシステムによる機械操作の経験がある．

比較実験では，従来のボタン操作やキーボード操作等の日常的に利用頻度の高いインターフェースを混在させた比較実験用システムの 2 つを用いて，LED light, fan, robot car, Black robot arm, robot arm の合計 5 つの機械制御を行った．その後アンケートに回答してもらい，実験を終了した．

4.1 動作実験と結果

本実験では，視覚スイッチシステムを用いた操作対象の選択と確定及び，被験者自身が希望した動作の実行可能性の確認を行った．また，本システムにおいて，ジェスチャ操作から特定の動作を実行するのに要する時間は約 6 秒間と固定したため，操作対象の選択と確定を行う視覚スイッチシステムの操作時間を被験者別に計測し，それをシステム全体の操作時間として評価した．以下の図 4 に各々の機械に対する被験者別の計測結果を示す．

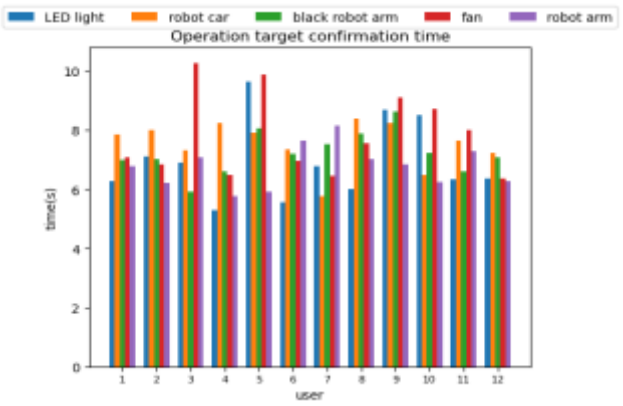

図 4　被験者別の操作時間

自身が決めた振り方でジェスチャ操作を行い，想定通り

© 2025 Information Processing Society of Japan.

の動作を実行できたのが 8 名，何度か繰り返し振りなおすことで想定通りの動作を実行できたのが 2 名，何度振りなおしても想定した動作に実行できなかったのが 2 名という結果を得た．また，被験者 4 と 12 は視覚スイッチシステムでの物体操作の経験があり，その他の被験者と比べ操作時間を短縮した結果を得た．従って，より直感的な操作対象の選択と確定を行うには，試行回数を増やす必要があると考える．

4.2 比較実験

オーケストラシステムで各振り方に対応した動作を二段構成で以下の表 1-a,b に示す．

表 1-a　LED light, robot arm, black robot arm の動作一覧

振り方	LED light	robot car	black robot arm
1	遅い点滅	速い時計回り	A の方向に下げる
2	速い点滅	遅い時計回り	A の方向に上げる
3	点灯	反時計回り	B の方向に下げる
4	消灯	停止	B の方向に上げる

表 1-b　fan, robot arm の動作一覧

振り方	fan	robot arm
1	強風	A の方向に上下する
2	弱風	B の方向に上下する
3	中風	C の方向い上下する
4	停止	D の方向に上下する

以下にオーケストラシステムを用いた実験の手順を示す．

1. 被験者は，事前に 4 つの振り方を決める．
2. 4 つの振り方が決定した後，システムを起動させ，実験監督者がランダムに操作対象を指定する．
3. 被験者が視覚スイッチシステムで操作対象を確定させた後，実験監督者が表 1-a,b に従って，ランダムに操作指示を与える．
4. 与えられた指示通りの制御ができるまで，被験者はジェスチャ操作を行い，指示通りの動作を確認する．確認後，同様に操作指示又は，操作対象の変更を指示する．
5. 手順 1 から手順 4 を繰り返し行い，それぞれの機械が表 1-a,b に示した全ての動作に制御できた時点で，オーケストラシステムを終了する．その後，アンケートに回答し，実験を終了する．

次に比較実験用システムでは，LED light はボタン操作，robot car と black robot arm はキーボード操作，fan と robot arm はジョイコン操作で制御し，それぞれに対応した動作を以下の表 2-a,b,c に示す．

表 2-a　ボタン操作の動作一覧

LED light	
青ボタン	遅い点滅
白ボタン	速い点滅
黄ボタン	点灯
緑ボタン	消灯

表 2-b　キーボード操作の動作一覧

robot car		black robot arm	
Q	速い時計回り	P	A の方向に下げる
W	遅い時計回り	O	A の方向に上げる
E	反時計回り	I	B の方向に下げる
R	停止	U	B の方向に下げる

表 2-c　ジョイコン操作の動作一覧

fan		robot arm
上	強風	A の方向に上下する
右	弱風	B の方向に上下する
左	中風	C の方向に上下する
下	停止	D の方向に上下する

次に比較実験用システムを実験の手順を示す．

1. 実験監督者が操作対象の指定と操作指示を行う．
2. 与えられた指示通りの制御ができるまで行い，指示通りの動作を確認する．確認後，同様に操作対象の指定と操作指示を行う．
3. 手順 1 から手順 2 を繰り返し行い，それぞれの機械が表 2-a,b,c に示した全ての動作に制御できた時点で，比較実験用システムを終了する．その後，アンケートに回答し，実験を終了する．

4.3 比較実験用システムの概要

比較実験用システムの概要を以下の図 5 に示す．

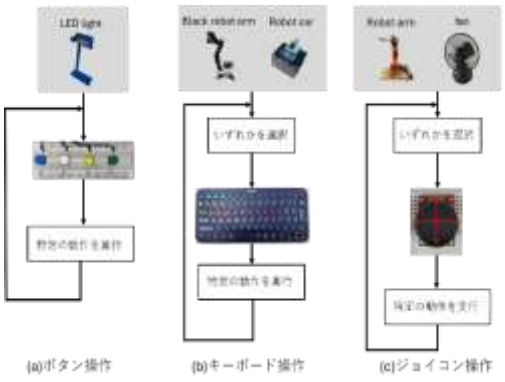

図 5　比較実験用システムの概要

今回比較実験用システムでは，LED light をボタン操作，robot car と black robot arm をキーボード操作，fan と robot arm をジョイコン操作で制御する．

ボタン操作では，図 5（a）に示した 4 つのボタンを用いて，LED light の制御を行う．ボタンのいずれかを押すこと

© 2025 Information Processing Society of Japan.

で，表 2-a に示された動作を実行する．

次に，キーボード操作では，図 5（b）に示したキーボードを用いて，robot car と black robot arm の制御を行う．キーボードの有効キーは，それぞれ「Q」，「W」，「E」，「R」と「P」，「O」，「I」，「U」の合計 8 つであり，それぞれのキーが表 2-b に示した動作を実行する．

最後に，ジョイコン操作では，図 5（c）に示したジョイコンを用いて，fan と robot arm の制御を行う．ジョイコンは，それぞれの機械に 1 つずつ接続されている．また，ジョイコンの有効可動域は上下左右の 4 つであり，いずれかの方向にジョイコンを押し倒すことで，表 2-c に示されたいずれかの動作を実行する．

4.4 評価方法

各実験終了後にシステムの使いやすさを評価する手法として，システムユーザビリティスケール（SUS）[5]を用いたアンケートに回答してもらい，オーケストラシステムの直感性を評価する．以下に SUS の質問内容を示す．

1. このシステムを頻繁に使いたいと思う．
2. このシステムは必要以上に複雑だと感じた．
3. このシステムは使いやすいと思った．
4. このシステムを利用するには，専門家のサポートが必要だと思う．
5. このシステムの様々な機能はうまく統合されていると感じた．
6. このシステムは整合性が取れていない部分が多すぎると思った．
7. ほとんどの人はこのシステムをすぐに使いこなせるようになると思う．
8. このシステムを使うのに非常に手間がかかると感じた．
9. 自信をもってこのシステムを使うことができた．
10. このシステムを使う前に多くのことを学ぶ必要があった．

上記より，奇数問がポジティブな質問，偶数問がネガティブな質問の合計 10 問で構成されており，以下の評価基準を用いて回答する．

1：とてもそう思わない
2：そう思わない
3：どちらでもない
4：そう思う
5：とてもそう思う

SUS では，それぞれ以下に示す計算方法を用いて，100 点満点のスコア（SUS スコア）に変換することができ，主観的なユーザフィードバックを数値で表すことができる．

・x = 各奇数問のポイントから 1 を差し引いた合計
・$y = 5$ から各偶数問のポイントを差し引いた合計
・$(\text{SUS スコア}) = (x + y) \times 2.5$

また，SUS のアンケート後にシステムについての感想や意見を自由に記述できる欄を設置し，被験者ごとの具体的なシステムの評価を調査した．

5. 実験結果と考察

比較実験では，本システムと比較実験用システムの SUS スコアを比較したとき，本システムの SUS スコアの方が大きくなった被験者のグラフを図 6，比較実験用システムの SUS スコアが大きくなった被験者のグラフを図 7 に示す．赤色の棒グラフは，比較実験用システム，青色の棒グラフは本システムを示している．また，オーケストラシステムの SUS スコアと比較実験用システムの SUS スコアに差異が見られなかった被験者が 2 名という結果を得た．

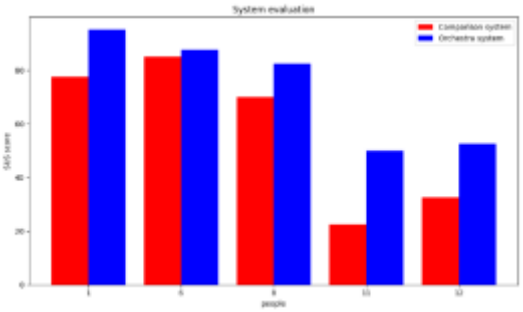

図 6　本システムの SUS スコアが大きい被験者

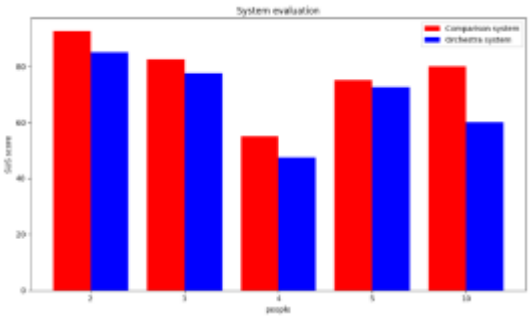

図 7　比較実験用システムの SUS スコアが大きい被験者

また，各システムの SUS スコアの平均，不偏分散，標準偏差，最高スコア，最低スコアを以下の表 3 に示す．

表 3　SUS スコアの詳細

	オーケストラシステム	比較実験用システム
平均スコア	68.23	70.42
不偏分散	615.5	498.7
標準偏差	24.81	22.33
最高スコア	95	92.5
最低スコア	47.5	22.5

© 2025 Information Processing Society of Japan.

図 6，7 より，オーケストラシステムのスコアが高かった人数と比較実験用システムのスコアが高かった人数による評価では，直感性に関する優劣を決定するのは困難である．しかし表 3 より，最高スコアと最低スコアに着目すると本システムの方が高い結果を得ることができ，比較実験用システムよりも直感的な操作を行える可能性があるのではないかと考える．次に表 3 より，両システムの SUS の平均スコアに着目すると，比較実験用システムの方が高いといった結果が得られた．以上のことから，システム全体の評価では，比較実験用システムの方が本システムよりも直感性が優位にあることが分かる．また不偏分散値より，本システムは，比較実験用システムに比べ，SUS スコアのばらつきが目立ち，被験者全体に安定した使用感を持たせることができなかったと読み取れる．しかし，SUS スコアでは，68 点以上を一般的に良好なシステムとする指標があり，本システムもその指標を上回る結果を得ることができた．現時点では，本システムは従来のインターフェースに比べ，直感性に劣ることが分かった．以下，比較実験より得られた結果から考察する．

本システムのジェスチャ操作では，指示通りの操作ができなかった被験者や振り方を忘れてしまう被験者が見られた．原因として，三軸加速度センサの一軸のみを用いており，振り方の自由度を小さくしてしまった点が挙げられる．従って，軸数を増やし，振り方の自由度の向上させることで，より直感的なジェスチャ操作に直結するのではないかと考える．また，SUS スコアの平均による比較では，比較実験用システムに劣るが，同数の高スコア者や最高点と最低点において本システムが優位にある点から，ユーザに機械操作におけるインターフェースの選択が可能であると考える．

6. おわりに

本研究ではオーケストラのようなノンバーバルなインタラクションを人間と機械間で実行できる直感的なシステムの開発を行った．これにより，新しいインタフェースモダリティを対案することができた．

今後の展望として，人間は，伝達された命令を第三者に指示することで役割を分担し，組織的にネットワークを広げることで作業を効率化する．このネットワークを本システムに模倣し，人間から操作指示を受命した機械が他の機械に操作指示を伝達し，伝達された真の命令を相互に機械が働きかけ，複数の機械で実行できるようなシステムの開発を目指す．

参考文献

[1] S. Kobayashi and P. Hartono, Eye Contact as a New Modality for Man-machine Interface, International Journal of Advanced Computer Science and Applications(IJACSA), 14(3), pp.42-49, 2023.

[2] 渡邊光，et al.，加速度センサを用いたジェスチャ認識における連続動作の認識手法，マルチメディア，分散，協調とモバイル（DICOMO2016）シンポジウム，pp.1677-1684，2016.

[3] K.Eamonn and M.J Pazzani, Derivative dynamic time warping, Proceedings of the 2001 SIAM international conference on data mining, Society for Industrial and Mathematics, pp.1-11, 2001.

[4] Mei-Hua Lee, et al., Body-machine interface for control of a screen cursor for a child with congenital absence of upper and lower limbs: a case report, Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 13(34), 2016.

[5] J. Brooke, SUS-A quick and dirty usability scale. in Usability evaluation in industry, pp.189-194, 1996.

© 2025 Information Processing Society of Japan.