**Abst**

We propose a practical state-of-the-art method to develop a machine-learning-based humanoid robot that can work as a production line worker.

生産ラインの労働者として働くことができる機械学習ベースのヒューマノイドロボットを開発するための実用的な最先端の方法を提案します。

The proposed approach provides an intuitive way to collect data and exhibits the following characteristics: task performing capability, task reiteration ability, generalizability, and easy applicability.

提案されたアプローチは、データを収集する直観的な方法を提供し、次の特性を示します。タスク実行機能、タスク反復機能、一般化可能性、および容易な適用可能性。

The proposed approach utilizes a real-time user interface with a monitor and provides a first-person perspective using a head-mounted display.

提案されたアプローチは、モニターを備えたリアルタイムユーザーインターフェースを利用し、ヘッドマウントディスプレイを使用して一人称視点を提供します。

Through this interface, teleoperation is used for collecting task operating data, especially for tasks that are difficult to be appliedwith a conventional method.

このインターフェースを介して、特に従来の方法では適用が困難なタスクのタスク操作データを収集するために、テレオペレーションが使用されます。

A two-phase deep learning model is also utilized in the proposed approach.

提案されたアプローチでは、2段階の深層学習モデルも利用されます。

A deep convolutional autoencoder extracts images features and reconstructs images, and a fully connected deep time delay neural network learns the dynamics of a robot task process from the extracted image features and motion angle signals.

ディープコンボリューショナルオートエンコーダーは画像の特徴を抽出して画像を再構築し、完全に接続されたディープタイムディレイニューラルネットワークは、抽出された画像の特徴と運動角度信号からロボットタスクプロセスのダイナミクスを学習します。

The “Nextage Open” humanoid robot is used as an experimental platform to evaluate the proposed model.

「Nextage Open」ヒューマノイドロボットは、提案されたモデルを評価するための実験プラットフォームとして使用されます。

The object folding task utilizing with 35 trained and 5 untrained sensory motor sequences for test.

テスト用に35の訓練された感覚モーターシーケンスと5つの訓練されていない感覚モーターシーケンスを使用したオブジェクト折りたたみタスク。

Testing the trained model with online generation demonstrates a 77.8% success rate for the object folding task.

オンライン生成を使用してトレーニング済みモデルをテストすると、オブジェクト折りたたみタスクの成功率が77.8％であることが実証されています。

**Intro**

society as a whole. In addition, as market demands change, the manufacturing industry is switching to small-quantity, multivariety production.

社会全体。さらに、市場の需要の変化に伴い、製造業は少量多品種生産に切り替えています。

Consequently, more production facilities that can handle various products will be required [1].

したがって、さまざまな製品を扱うことができる生産設備がさらに必要になります[1]。

Such facilities must be more flexible and able to perform different tasks for different products.

そのような施設は、より柔軟で、製品ごとに異なるタスクを実行できる必要があります。

To achieve this, robots with multiple degrees-of-freedom arms, image recognition systems, and massive databases with pre-designed motion sequences represent a possible solution.

これを達成するために、複数の自由度アームを備えたロボット、画像認識システム、および事前に設計されたモーションシーケンスを備えた大規模データベースが、可能なソリューションを表しています。

However, this solution may not be suitable for factories that produce or disassemble similar types of products.

ただし、このソリューションは、同様のタイプの製品を製造または分解する工場には適さない場合があります。

It is nearly impossible to utilize current pre-design methods to substitute these jobs from human worker.

現在の事前設計方法を利用して、これらのジョブを人間の労働者から置き換えることはほぼ不可能です。

When producing similar types of products, manufacturing tasks are repetitive and tend to require limited human intelligence.

同様のタイプの製品を生産する場合、製造タスクは反復的であり、限られた人間の知能を必要とする傾向があります。

Thus, it is anticipated that future labor shortages will affect this type of production.

したがって、将来の労働力不足がこの種の生産に影響を与えることが予想されます。

Recently, artificial neural network learning models with “deep” structure (i.e., deep neural networks) have demonstrated success in image and speech recognition.

最近、「深い」構造を持つ人工ニューラルネットワーク学習モデル（つまり、ディープニューラルネットワーク）は、画像と音声の認識で成功を収めています。

It is expected that this machine learning method will be applied to robot tasks; however, constructing a machine learning model for an unstructured environment requires considerable training data.

この機械学習法は、ロボットのタスクに適用されることが期待されています。ただし、非構造化環境の機械学習モデルを構築するには、かなりのトレーニングデータが必要です。

Normally, direct teaching and imitation learning methods are utilized for data collection; however, hardware limitations and control issues can hinder the construction of a system suitable for tasks.

通常、データの収集には直接指導と模倣学習の方法が利用されます。ただし、ハードウェアの制限と制御の問題により、タスクに適したシステムの構築が妨げられる可能性があります。

The target of this study is a machine learning-based model to control robots that can perform tasks in an uncertain environment, such as a production line with human workers.

この研究の対象は、人間の労働者がいる生産ラインなど、不確実な環境でタスクを実行できるロボットを制御するための機械学習ベースのモデルです。

Therefore, we must consider practical applications, the convenience of an operational system, the ability to perform repetitive tasks automatically, and the ability to perform multiple tasks.

したがって、実用的なアプリケーション、運用システムの利便性、繰り返しタスクを自動的に実行する機能、および複数のタスクを実行する機能を考慮する必要があります。

**To satisfy these requirements, we set the following objectives.**

**これらの要件を満たすために、次の目標を設定します。**

**I: Task capability:**

**The robot has sufficient knowledge and is capable of performing a given task.**

**I：タスク機能：**

**ロボットには十分な知識があり、特定のタスクを実行できます。**

**II: Reiteration ability:**

**The robot can perform tasks repeatedly.**

**II：反復能力：**

**ロボットはタスクを繰り返し実行できます。**

**III: Generalizability:**

**The robot can perform multiple tasks and the same task with similar objects.**

**III：一般化可能性：**

**ロボットは、複数のタスクと類似のオブジェクトを使用して同じタスクを実行できます。**

**IV: Easy applicability to a factory robot (nonbackdrivable robot):**

**The proposed method should be easy to apply with few limitations.**

**IV：工場のロボット（非後方駆動ロボット）への容易な適用性：**

**提案された方法は、制限がほとんどなく、簡単に適用できるはずです。**

To evaluate performance and test practical cases, folding a soft object was selected as the task due to the difficulty of a pre- designed pipeline method to accomplish this type of task.

パフォーマンスを評価し、実用的なケースをテストするために、このタイプのタスクを達成するための事前に設計されたパイプラインメソッドの難しさから、ソフトオブジェクトの折りたたみがタスクとして選択されました。

The folding task is a well-known and difficult manipulation task that can be used to address unpredictable changes during the folding process with robots due to dynamic environmental information, as mentioned in the previous section.

前のセクションで述べたように、折り畳みタスクは、動的な環境情報に起因するロボットによる折り畳みプロセス中の予測できない変化に対処するために使用できる、よく知られた困難な操作タスクです。

The generalization and reiteration abilities can be tested with objects that never be used in the training data.

一般化および反復能力は、トレーニングデータで決して使用されないオブジェクトでテストできます。

This task will be used in situations without specific setup and calibration to demonstrate the effectiveness of the proposed model.

このタスクは、提案されたモデルの有効性を実証するために、特定のセットアップとキャリブレーションのない状況で使用されます。

Experimental results indicate that the proposed model holds promise for realizing a smart robot worker, and it is expected that the model can be applied to various tasks.

実験結果は、提案されたモデルがスマートロボットワーカーの実現に有望であることを示しており、さまざまなタスクに適用できることが期待されます。

The rest of the paper is organized as follows.

残りのペーパーは次のように構成されています。

Section II introduces related works that have been done.

セクションIIでは、行われた関連作業を紹介します。

The challenges and the contributions of this paper are also described in this section.

このセクションでは、このペーパーの課題と貢献についても説明します。

Section III introduces the approach of this study, which includes the introduction to the process of gathering data, architecture of models and how it be trained.

セクションIIIでは、この調査のアプローチを紹介します。これには、データ収集プロセス、モデルのアーキテクチャ、およびトレーニング方法の紹介が含まれます。

Section IV describes the experiment setting including robot’s motions, objects to be used for collecting training dataset, parameters of model training and the results.

セクションIVでは、ロボットの動き、トレーニングデータセットの収集に使用されるオブジェクト、モデルトレーニングのパラメーター、および結果を含む実験設定について説明します。

Section V discusses the robustness and the possible method to boost the performance of task doing.

セクションVでは、タスク実行のパフォーマンスを向上させるための堅牢性と可能な方法について説明します。

Section VI concludes the result and demonstrates the effectiveness of proposed approach.

セクションVIで結果をまとめ、提案されたアプローチの有効性を示します。

**RELATED WORK**

The ability of robots to perform manipulation tasks, such as object grasping and inserting bolts, has been investigated [2].

ロボットが物体の把持やボルトの挿入などの操作タスクを実行できるかどうかが調査されています[2]。

More complicated tasks such as folding clothes [3], [4] and wiring cables [5], [6] have also been studied.

衣服を折りたたむ[3]、[4]、ケーブルを配線する[5]、[6]など、より複雑な作業も研究されています。

These studies have demonstrated that such tasks can be performed by various approaches; however, the success rate of these methods typically depends on human-designed control, image feature extraction, and environment.

これらの研究は、こうしたタスクがさまざまなアプローチで実行できることを実証しています。ただし、これらの方法の成功率は通常、人間が設計した制御、画像特徴抽出、および環境に依存します。

The approaches proposed in previous studies might be difficult work to apply to an environment characterized by complex and uncertain situations.

以前の研究で提案されたアプローチは、複雑で不確実な状況を特徴とする環境に適用するのが難しい作業である可能性があります。

Researchers have attempted to develop methods for manipulation tasks and incorporate some type of smart control.

研究者は、操作タスクの方法を開発し、ある種のスマートコントロールを組み込むことを試みました。

The deep learning method has been applied to static image recognition [7].

深層学習法は、静的画像認識に適用されています[7]。

This method achieved a recognition rate considerably greater than human recognition ability.

この方法は、人間の認識能力よりもかなり高い認識率を達成しました。

Super-resolution convolutional networks [8] inspired the Internet-based waifu2x super-resolution service [9].

超解像畳み込みネットワーク[8]は、インターネットベースのwaifu2x超解像サービス[9]に影響を与えました。

Deep learning has also been used to train sequential data, e.g., in self-driving car research [10], and for undefined object grasping [11]–[13].

ディープラーニングは、たとえば自動運転車の研究[10]や未定義の物体把握[11]〜[13]など、シーケンシャルデータのトレーニングにも使用されています。

A machine learning method has also been applied to robot tasks [14].

機械学習法は、ロボットのタスクにも適用されています[14]。

This research proposed a reinforcement learning method to train a trajectory policy and robot arm actuator torque signals; however, tasks that require different amounts of time and are performed under different operational conditions must be trained separately.

この研究では、軌道ポリシーとロボットアームアクチュエータのトルク信号をトレーニングする強化学習法を提案しました。

Noda et al. [15], proposed a model that considered multiple-behavior learning and information from multiple modalities automatically.

野田ら[15]は、複数の行動の学習と複数のモダリティからの情報を自動的に考慮するモデルを提案しました。

Their model combined two fully connected neural networks, i.e., an image feature extraction network and a dynamic learning model.

彼らのモデルは、2つの完全に接続されたニューラルネットワーク、つまり画像特徴抽出ネットワークと動的学習モデルを組み合わせたものです。

Noda et al. successfully applied their model to multiple periodic motion behaviors using NAO, a hobby-sized humanoid robot.

野田ら趣味のサイズのヒューマノイドロボットであるNAOを使用して、複数の周期的な運動動作にモデルを適用しました。

Suzuki et al. adopted a structure similar to that proposed by Noda et al. and successfully used a PR2 robot for the soft object folding task [16].

鈴木や野田らによって提案されたものと同様の構造を採用した。そして、ソフトオブジェクトの折りたたみタスクにPR2ロボットを使用することに成功しました[16]。

However, their method cannot perform task repeatable and [16], [15] both use a direct teaching method that can only be applied to backdrivable robots.

ただし、それらの方法は反復可能なタスクを実行できず、[16]、[15]は両方とも、逆駆動可能なロボットにのみ適用できるダイレクトティーチング方法を使用します。

In addition, with these methods, it is difficult to determine the effectiveness of sensory-motor data.

さらに、これらの方法では、感覚運動データの有効性を判断することは困難です。

The current study focuses on the effects of dynamic information on interactive robot-environment information (sensorymotor information) and uses a humanoid robot and a folding task to evaluate the proposed method.

現在の研究では、インタラクティブなロボット環境情報（感覚運動情報）に対する動的情報の影響に焦点を当て、提案手法を評価するためにヒューマノイドロボットと折り畳みタスクを使用しています。

Based on our approach, it is effective to make industrial level humanoid robot be able to do tasks that requires high adaptability instead of pipeline method.

私たちのアプローチに基づいて、産業レベルのヒューマノイドロボットがパイプライン方式ではなく高い適応性を必要とするタスクを実行できるようにすることは効果的です。

Moreover, through our architecture, the effort of designing evaluation function for reinforcement learning can be eliminated and substituted by direct learning from experimenter’s operating experience.

さらに、当社のアーキテクチャにより、強化学習の評価関数を設計する労力を排除し、実験者の操作経験からの直接学習に置き換えることができます。

**APPROACH**

We present an approach to achieve a deep learning method that can be applied to an adaptable task-performing humanoid robot operating in an uncertain environment.

不確実な環境で動作する適応可能なタスク実行ヒューマノイドロボットに適用できる深層学習方法を実現するアプローチを提示します。

For objectives I and III, to achieve sufficiently high generalizability suitable for an uncertain environment, deep learning is applied to learn the sensory-motor information acquired from the robot.

目標IおよびIIIでは、不確実な環境に適した十分に高い一般化可能性を実現するために、ロボットから取得した感覚運動情報を学習するためにディープラーニングが適用されます。

That information grants proposed model to perform task operation.

その情報は、提案されたモデルにタスク操作を実行することを許可します。

In order to achieve objective II with deep learning, all sequences are designed to begin and end at the same robot pose.

深層学習で目標IIを達成するために、すべてのシーケンスは同じロボットポーズで開始および終了するように設計されています。

For objective IV, the teleoperation technique is used to acquire data that can ignore the robots configuration.

客観的IVでは、遠隔操作技術を使用して、ロボットの構成を無視できるデータを取得します。

To apply deep learning to a robot task, (1) data collection, (2) training, and (3) task generation phases are required.

ロボットタスクにディープラーニングを適用するには、（1）データ収集、（2）トレーニング、（3）タスク生成フェーズが必要です。

The flow of the approach is shown in Fig. 1 where “Teleoperation Training,” ”Learning Model,” and “GenerateMotions for Tasks” correspond to the data collection, training, and task generation phases, respectively.

アプローチのフローを図1に示します。「Teleoperation Training」、「Learning Model」、および「GenerateMotions for Tasks」は、それぞれデータ収集、トレーニング、およびタスク生成フェーズに対応しています。

**Data Collection Phase**

Fig. 2. Sensory-motor experience sharing: Using remote monitoring or a head-mounted display, the operator can operate the robot directly and sharing same sensation to acquire proper sensory-motor experience (data).

図2.感覚運動体験の共有：リモートモニタリングまたはヘッドマウントディスプレイを使用して、オペレーターはロボットを直接操作し、同じ感覚を共有して適切な感覚運動体験（データ）を取得できます。

This ensures that the collected sensory-motor data are able to operate by the sense of human and are expected to be effective for deep learning.

これにより、収集された感覚運動データが人間の感覚で動作し、ディープラーニングに効果的であることが期待されます。

Data collection is an important step in deep learning and is particularly important for tasks that require precisely timed motions.

データ収集はディープラーニングの重要なステップであり、正確なタイミングのモーションを必要とするタスクには特に重要です。

Some deep learning research has used direct teaching to guide robot arms to perform tasks; however, direct teaching can only be applied to backdrivable robots that are typically used to manufacture specialized products.

いくつかの深層学習の研究では、ロボットアームがタスクを実行するように誘導するために直接教育を使用しています。ただし、直接教示は、特殊な製品の製造に通常使用される逆駆動可能なロボットにのみ適用できます。

Such robots can be prohibitively expensive for factory that usually only equipped with non-backdrivable robots and requires capabilities for practical task operation.

このようなロボットは、通常は逆駆動できないロボットのみを装備し、実際のタスク操作のための機能を必要とする工場にとって非常に高価になる可能性があります。

The objective of the current study is to propose an effective data collection method without robot limitations.

現在の研究の目的は、ロボットの制限なしに効果的なデータ収集方法を提案することです。

1) Teleoperation Training: Awano et al. applied the teleoperation method to collect training data and successfully realized humanrobot cooperative behavior [17].

1）遠隔操作訓練：粟野らの遠隔操作法を適用してトレーニングデータを収集し、人間ロボットの協調行動を実現しました[17]。

The current study utilizes same technique makes it can be applied to almost all kinds of robots, particularly for non-backdrivable robots.

現在の研究では同じ手法を利用しており、特にあらゆる種類のロボット、特に後進できないロボットに適用できます。

The teleoperation can involve any amount of control, from fully autonomous to complete manual control, as well as mixedinitiative interactions.

テレオペレーション(遠隔操作技術)には、完全に自律的なものから完全な手動制御まで、および混合イニシアチブ相互作用まで、あらゆる量の制御が含まれます。

Such a combined command procedure can provide advantages for data collection.

このような複合コマンドプロシージャは、データ収集に利点をもたらします。

A fully autonomous command system can utilize pre-designed motions and behaviors o reduce programming time for predictable behavior.

完全に自律的なコマンドシステムは、事前に設計された動作と動作を利用して、予測可能な動作のプログラミング時間を短縮できます。

Asemi-autonomous command refers to self-autonomous behavior that requires guidance information, such as a guided missile used by the military.

半自律コマンドは、軍隊が使用する誘導ミサイルなどの誘導情報を必要とする自己自律的な動作を指します。

A semi-autonomous command process an provide satisfactory robot behavior for motions that require high precision.

半自律的なコマンドプロセスは、高精度を必要とする動作に対して満足のいくロボットの動作を提供します。

With manual control, a human operator directly controls the robot’s actuators to perform tasks.

手動制御では、人間のオペレーターがロボットのアクチュエーターを直接制御してタスクを実行します。

Some data, such as sensor signals and image data can be collected during teleoperation.

センサー信号や画像データなどの一部のデータは、遠隔操作中に収集できます。

These sequential data are collected directly from the robot with different autonomous command levels.

これらのシーケンシャルデータは、異なる自律コマンドレベルでロボットから直接収集されます。

Furthermore, sensory-motor data that contain robot motor angles and image data captured by the robot-mounted camera are collected for the training phase, as shown in Fig. 2.

さらに、図2に示すように、ロボットモーターの角度を含む感覚運動データと、ロボットに取り付けられたカメラでキャプチャされた画像データがトレーニングフェーズで収集されます。

**Traning Model Phase**

The collected data are used to train the deep learning model proposed in this study.

収集されたデータは、この研究で提案された深層学習モデルのトレーニングに使用されます。

The model comprises two parts, as shown as Fig. 3.

モデルは、図3に示すように2つの部分で構成されています。

With this two-step end-to-end training process, the proposed model can handle raw input data adaptively to deal with small changes in the environment and perform corresponding motions from the output command signal.

この2段階のEnd-to-Endトレーニングプロセスにより、提案されたモデルは生の入力データを適応的に処理して、環境の小さな変化を処理し、出力コマンド信号から対応する動作を実行できます。

**Deep Convolutional Autoencoder (DCAE):**

Convolutional neural networks (CNNs) are powerful image-processing tools, particularly for image recognition.

畳み込みニューラルネットワーク（CNN）は、特に画像認識のための強力な画像処理ツールです。

A CNN contains sliding filters, which are similar to biological cells that can exploit a strong response to a spatially local input pattern and cover the entire input image.

CNNにはスライディングフィルターが含まれています。これは、空間的に局所的な入力パターンに対する強力な応答を活用し、入力画像全体をカバーできる生体細胞に似ています。

CNNs can handle considerably more input dimensions than fully connected neural networks while using fewer parameters.

CNNは、より少ないパラメーターを使用しながら、完全に接続されたニューラルネットワークよりもかなり多くの入力ディメンションを処理できます。

This greatly decreases the training time and enhances performance for image processing or similar data input.

これにより、トレーニング時間が大幅に短縮され、画像処理または同様のデータ入力のパフォーマンスが向上します。

Furthermore, a model with a deep convolutional layer structure can extract data to different levels of features from edges to partial parts of the image.

さらに、深い畳み込み層構造のモデルは、エッジから画像の部分的な部分まで、さまざまなレベルの特徴にデータを抽出できます。

This study utilized convolutional layers to present a DCAE that can handle a high-resolution image to the small size of feature map.

この研究では、畳み込み層を使用して、高解像度の画像を小さなサイズの特徴マップに処理できるDCAEを提示しました。

Convolutional layers with a stride can extract features and down-sample the dimension of information.

ストライドのある畳み込みレイヤーは、特徴を抽出し、情報の次元をダウンサンプリングできます。

Deconvolutional layers are used to reconstruct images from the encoded feature map.

デコンボリューションレイヤーは、エンコードされたフィーチャマップから画像を再構築するために使用されます。

With a trained DCAE, half of the models structure (the input layer to themiddle layer) is used to encode (compress) the information to small-dimension image features compared to the original input image.

訓練されたDCAEでは、モデル構造の半分（中間層への入力層）を使用して、元の入力画像と比較して、情報を小サイズの画像特徴にエンコード（圧縮）します。

These encoded image features can represent the state of an input image and provide high resolution input information with fewer dimensions.

これらのエンコードされた画像機能は、入力画像の状態を表し、より少ない次元で高解像度の入力情報を提供できます。

Batch normalization is used to optimize learning and reduce the possibility of overfitting problems.

バッチ正規化は、学習を最適化し、問題の過剰適合の可能性を減らすために使用されます。

The DCAE structure is shown in Table I.

DCAE構造を表Iに示します。

Networks are trained to reconstruct input image data at the output layer.

ネットワークは、出力画像層で入力画像データを再構築するために訓練されます。

In this study, training data for DCAE utilize sequential images acquired from the robot mounted camera.

この研究では、DCAEのトレーニングデータは、ロボットに取り付けられたカメラから取得した連続画像を利用します。

The target of each input image is the original input data, and the mean square error (MSE) is used to modify the weight of neural networks by using Adam optimization [18].

各入力画像のターゲットは元の入力データであり、平均二乗誤差（MSE）は、Adam最適化[18]を使用してニューラルネットワークの重みを変更するために使用されます。

**Time-Delay Neural Network:**

TDNN is a fully connected feed-forward neural network trained for temporal sequence data with time step windows [19].

TDNNは、時間ステップウィンドウ[19]で時系列データ用にトレーニングされた完全に接続されたフィードフォワードニューラルネットワークです。

Noda et al. proposed a model that utilized a TDNN with multi-modality signals and achieved multi-behavior with NAO, a hobby-sized robot [15].

野田らマルチモダリティ信号でTDNNを使用し、趣味のサイズのロボットであるNAOでマルチ動作を実現したモデルを提案しました[15]。

A TDNN with deep-structured layers can successfully reconstruct sequential data, and it is possible to generate a continuous sequence by shifting input information.

深層構造のレイヤーを持つTDNNは、シーケンシャルデータを正常に再構築でき、入力情報をシフトすることで連続シーケンスを生成することができます。

A TDNN can be used for online generation that is executed by shifting the input window over time and repeatedly inputting the extracted image (camera image) features and motions (motor angles) in real time.

TDNNは、時間の経過とともに入力ウィンドウをシフトし、抽出された画像（カメラ画像）の特徴と動き（モーター角度）をリアルタイムで繰り返し入力することで実行されるオンライン生成に使用できます。

The structure of the TDNN used in this study is shown in Table II.

この研究で使用したTDNNの構造を表IIに示します。

The TDNN can learn sequential information with multiple sensory-motor signal inputs.

TDNNは、複数の感覚運動信号入力を使用して逐次情報を学習できます。

Image features extracted from a DCAE and robot motion are applied in the TDNN model.

DCAEおよびロボットの動きから抽出された画像の特徴は、TDNNモデルに適用されます。

The input of TDNN is a fixed windows size steps of data from dataset.

TDNNの入力は、データセットからのデータの固定ウィンドウサイズステップです。

During training, the target of each input data is the original input data, and the MSE is used to modify the weight by using Adam optimization.

トレーニング中、各入力データのターゲットは元の入力データであり、MSEはAdam最適化を使用して重みを変更するために使用されます。

The TDNN training dataset is created by sliding the training data over time.

TDNNトレーニングデータセットは、トレーニングデータを経時的にスライドさせて作成されます。