(19)日本国特許庁(JP)　(12)公表特許公報(A)　(11)公表番号
特表2024-528541
(P2024-528541A)
(43)公表日　令和6年7月30日(2024.7.30)

(51)国際特許分類		FI			テーマコード（参考）
Ｂ２５Ｊ　19/02　(2006.01)		Ｂ２５Ｊ	19/02		２Ｆ０５１
Ｇ０１Ｌ　5/00　(2006.01)		Ｇ０１Ｌ	5/00	１０１Ｚ	３Ｃ７０７
Ｇ０１Ｌ　5/169(2020.01)		Ｇ０１Ｌ	5/169		

審査請求　未請求　予備審査請求　未請求　（全30頁）

(21)出願番号　特願2023-580792(P2023-580792)
(86)(22)出願日　令和4年6月6日(2022.6.6)
(85)翻訳文提出日　令和5年12月28日(2023.12.28)
(86)国際出願番号　PCT/SG2022/050387
(87)国際公開番号　WO2023/277794
(87)国際公開日　令和5年1月5日(2023.1.5)
(31)優先権主張番号　10202107135Y
(32)優先日　令和3年6月29日(2021.6.29)
(33)優先権主張国・地域又は機関
シンガポール(SG)
(81)指定国・地域　AP(BW,GH,GM,KE,LR,LS,MW,MZ,NA,RW,SD,SL,ST,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,RU,TJ,TM),EP(AL,AT,BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR,GB,GR,HR,HU,IE,IS,IT,LT,LU,LV,MC,
最終頁に続く

(71)出願人　509034605
ナショナル ユニバーシティ オブ シンガポール
シンガポール共和国 シンガポール １１９０７７ ロウワー ケント リッジ ロード ２１
(74)代理人　100131451
弁理士　津田 理
(74)代理人　100167933
弁理士　松野 知紘
(74)代理人　100184181
弁理士　野本 裕史
(74)代理人　100220423
弁理士　榊間 城作
(72)発明者　ル，ゼユ
最終頁に続く

(54)【発明の名称】　力センサおよび力センサを組み込んだ装置

(57)【要約】
力センサアセンブリに接触力を伝達するための接触配置を含む力センサ。力センサアセンブリは、接触力の通常の接触力成分を検知して、接触力成分から出力を生成する第１のセンサと、接触力を力センサアセンブリに伝達する際に移動可能な本体と、を含む、接触配置と、第２のセンサに対する本体の相対変位を検知して、相対変位から出力を生成するための第２のセンサであって、相対変位から３軸接触力が決定される、第２のセンサと、を含む。

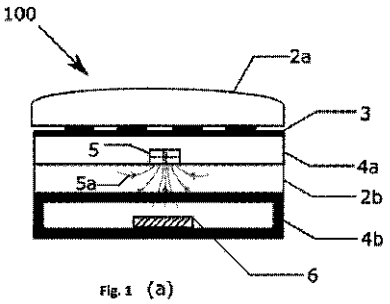


Fig. 1 (a)

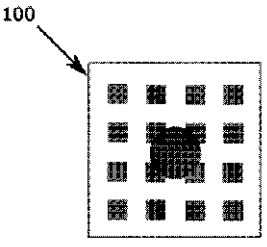


Fig. 1 (b)

【特許請求の範囲】
【請求項１】
接触力を力センサアセンブリに伝達するための接触配置と、
第２のセンサと、を備える力センサであって、
前記力センサアセンブリは、
前記接触力の通常の接触力成分を検知して、前記接触力成分から出力を生成する第１のセンサと、
前記接触力を前記力センサアセンブリに伝達する際に移動可能な本体と、を含み、
前記第２のセンサは、前記第２のセンサに対する前記本体の相対変位を検知して、前記相対変位から出力を生成し、
前記相対変位から３軸接触力が決定される、力センサ。
【請求項２】
前記接触配置が、前記接触力の下で変形する変形可能な基板を含む、請求項１に記載の力センサ。
【請求項３】
前記変形可能な基板がエラストマ基板である、請求項１または２に記載の力センサ。
【請求項４】
前記本体が磁石を含み、前記第２のセンサが１つまたは複数のホール効果センサである、請求項１から３のいずれか一項に記載の力センサ。
【請求項５】
前記本体が複数の磁石を含む、請求項４に記載の力センサ。
【請求項６】
前記本体が、
前記１つまたは複数の磁石を含む剛性層と、
一方の側が前記剛性層に固定され、反対側が前記ホール効果センサに対して固定された変形可能層と、を含み、
前記変形可能層が、前記接触力の下で、前記ホール効果センサに対する前記剛性層の変位を可能にする、請求項４または５に記載の力センサ。
【請求項７】
前記第２のセンサがチャンバ内に収容される、請求項１から６のいずれか一項に記載の力センサ。
【請求項８】
前記力センサを装置に組み込むための基部構造体をさらに含み、
前記基部チャンバは、前記基部構造体に組み込まれる、または、当接する、請求項７に記載の力センサ。
【請求項９】
前記本体が、前記第１のセンサと前記第２のセンサとの間の基板に埋め込まれる、請求項１から８のいずれか一項に記載の力センサ。
【請求項１０】
前記第１のセンサが、１つまたは複数のセンサを含み、
その各々は、マトリックスピエゾ抵抗センサ、圧電センサ、静電容量センサ、摩擦電気センサ、および光学センサのうちの１つである、請求項１から９のいずれか一項に記載の力センサ。
【請求項１１】
前記接触配置を含む最上層と、第２の層と、前記最上層と前記第２の層との間の第１の層と、を有する多層構造を形成し、
前記第１の層および前記第２の層が、前記第１のセンサおよび前記第２のセンサのうちの異なるものをそれぞれ含む、請求項１から１０のいずれか一項に記載の力センサ。
【請求項１２】
前記本体が前記第１の層と前記第２の層との間に配置される、請求項１１に記載の力セ

ンサ。
【請求項１３】
前記第２のセンサが前記第２の層内にある、請求項１１または１２に記載の力センサ。
【請求項１４】
請求項１から１３のいずれか一項に記載の力センサのアレイを含む、力センサ装置。
【請求項１５】
請求項１から１３のいずれか一項に記載の力センサ、または、請求項１４に記載の力センサ装置を含むロボット装置。
【請求項１６】
グリッパである、請求項１５に記載のロボット装置。
【請求項１７】
請求項１から１３のいずれか一項に記載の力センサまたは請求項１４に記載の力センサ装置を含む人工装具。
【請求項１８】
人工腕、人工上肢または人工下肢のうちの１つである、請求項１７に記載の人工装具。
【請求項１９】
手のひら部分と、
複数の指部分と、
書き込み部分と、
使用中に対象物に接触するための接触点に配置された、請求項１から１３のいずれか一項に記載の複数の力センサと、
プロセッサと、を備え、
前記プロセッサは、
前記第１のセンサおよび前記第２のセンサの各々から出力を受信し、
前記出力から、１つまたは複数の高速適応（ＦＡ）応答ならびに１つまたは複数の低速適応（ＳＡ）応答を決定し、
前記１つまたは複数のＦＡ応答ならびに１つまたは複数のＳＡ応答に基づいて前記対象物の外部接触状態（ＥＣＳ）を識別する、ロボットハンド。
【請求項２０】
前記ＥＣＳを識別することが、前記１つまたは複数のＦＡ応答ならびに１つまたは複数のＳＡ応答から一次応答および二次応答を決定することを含む、請求項１９に記載のロボットハンド。
【請求項２１】
前記一次応答が垂直力および剪断力の一方または両方を含み、前記二次応答が時間変化パターンを含む、請求項２０に記載のロボットハンド。
【請求項２２】
対象物に対するロボットハンドの外部接触状態（ＥＣＳ）を識別するための、コンピュータ実装方法であって、
高速適応（ＦＡ）応答信号および低速適応（ＳＡ）応答信号を含む触覚検知信号を、前記ロボットハンドの各指部分から受信することと、
デコーダモデルによって前記触覚検知信号を処理して、前記ロボットハンドの各指部分に関連する触覚イベントデータを決定することと、
前記決定された触覚イベントデータを機械学習モデルによって処理して、前記対象物に対する前記ロボットハンドのＥＣＳを決定することと、を含むコンピュータ実装方法。
【請求項２３】
前記機械学習モデルが、トレーニングされた畳み込みニューラルネットワーク（ＣＮＮ）または二次判別分析（ＱＤＡ）モデルを含む、請求項２２に記載のコンピュータで実施される方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】

【０００１】
[0001]本開示は、一般に、力センサ、力センサを組み込んだロボット装置、および触覚力検知の方法に関する。
【背景技術】
【０００２】
[0002]この背景技術の説明は、本開示の文脈を一般的に提示する目的で提供される。この背景技術のセクションの内容は、本開示に対する先行技術として明示的にも暗示的にも認められない。
【０００３】
[0003]触覚センシング技術は、ロボット操作が複雑なタスクを実行し、複雑な環境で情報を収集することを可能にする。ピエゾ抵抗、光学、容量、気圧、または磁気の原理に基づくいくつかの触覚センシング技術が知られている。触覚検知は、垂直力および剪断力を含むいくつかの種類の力検知を含み得る。力は、１つの点で加えられてもよく、またはより大きな領域にわたって分散されてもよい。異なる動作または環境は、異なる分解能での力の測定を必要とする場合がある。いくつかのロボット操作では、接触力の位置を取得することが有益であり得る。
【０００４】
[0004]外部触覚力検知および接触位置推定のための既知のセンサは、現代の高感度および複雑なロボット工学の必要性を満たすのに十分に高い分解能および次元で力検知を十分に実行しない。既知のセンサアレイはまた、かさばり、サイズおよび重量の制限が重要ではない環境の適用性を制限する物理的サイズおよび重量の制約を受ける。
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【０００５】
[0005]先行技術に関連する１つまたは複数の欠点または制限に対処または改善すること、または少なくとも有用な代替案を提供することが望ましい。
【課題を解決するための手段】
【０００６】
[0006]本明細書では力センサが開示され、力センサは、
接触力を力センサアセンブリに伝達するための接触配置であって、
力センサアセンブリが、
接触力の通常の接触力成分を検知して、接触力成分から出力を生成する第１のセンサと、
接触力を力センサアセンブリに伝達する際に移動可能な本体と、を含む、接触配置と、
第２のセンサに対する本体の相対変位を検知して、相対変位から出力を生成するための第２のセンサであって、相対変位から３軸接触力が決定される、第２のセンサと、を含む。
【０００７】
[0007]接触配置は、接触力の下で変形する変形可能な基板を含んでもよい。
【０００８】
[0008]変形可能な基板は、エラストマ基板であってもよい。
【０００９】
[0009]本体は磁石を含んでもよく、第２のセンサは１つまたは複数のホール効果センサである。本体は、複数の磁石を含んでもよい。本体は、１つまたは複数の磁石を含む剛性層と、片側が剛性層に固定され、反対側がホール効果センサに対して固定された変形可能層と、を含んでもよく、変形可能層は、接触力の下で、ホール効果センサに対する剛性層の変位を可能にする。
【００１０】
[0010]第２のセンサは、チャンバ内に収容されてもよい。力センサは、力センサを装置に組み込むための基部構造体をさらに含んでもよく、基部チャンバは、基部構造体に組

み込まれるか、または基部構造体に当接する。
【００１１】
[0011]本体は、第１のセンサと第２のセンサとの間の基板に埋め込まれてもよい。
【００１２】
[0012]第１のセンサは、各々がマトリックスピエゾ抵抗センサ、圧電センサ、静電容量センサ、摩擦電気センサ、および光学センサのうちの１つである、１つまたは複数のセンサを含んでもよい。
【００１３】
[0013]力センサは、接触配置を含む最上層と、第２の層と、最上層と第２の層との間の第１の層と、を有する多層構造を形成してもよく、第１のセンサおよび第２のセンサのうちの異なるものをそれぞれ含む。
【００１４】
[0014]本体は、第１の層と第２の層との間に配置されてもよい。第２のセンサは、第２の層内にあってもよい。
【００１５】
[0015]上述のような力センサのアレイを含む力センサ装置も開示される。
【００１６】
[0016]上述の力センサ、または上述の力センサ装置を含むロボット装置も開示される。
【００１７】
[0017]ロボット装置はグリッパであってもよい。
【００１８】
[0018]上述の力センサまたは上述の力センサ装置を含む人工装具も開示される。
【００１９】
[0019]人工装具は、人工腕、人工上肢または人工下肢のうちの１つであってもよい。
【００２０】
[0020]本明細書ではロボットハンドも開示され、ロボットハンドは、
手のひら部分と、
複数の指部分と、
書き込み部分と、
使用中に対象物に接触するための接触点に配置された、上述した複数の力センサと、
プロセッサであって、
第１のセンサおよび第２のセンサの各々から出力を受信し、
出力から、１つまたは複数の高速適応（ＦＡ）応答ならびに１つまたは複数の低速適応（ＳＡ）応答を決定し、
１つまたは複数のＦＡ応答ならびに１つまたは複数のＳＡ応答に基づいて対象物の外部接触状態（ＥＣＳ）を識別する、ためのプロセッサと、を含む。
【００２１】
[0021]ＥＣＳを識別することは、１つまたは複数のＦＡ応答ならびに１つまたは複数のＳＡ応答から一次応答および二次応答を決定することを含んでもよい。
【００２２】
[0022]一次応答は、垂直力および剪断力の一方または両方を含んでもよく、二次応答は、時間変化パターンを含んでもよい。
【００２３】
[0023]本明細書では、対象物に対するロボットハンドの外部接触状態（ＥＣＳ）を識別するための、コンピュータで実施される方法も開示され、本方法は、ロボットハンドの各指部分から触覚検知信号を受信することであって、触覚検知信号が高速適応（ＦＡ）応答信号および低速適応（ＳＡ）応答信号を含み、受信することと、ロボットハンドの各指部分に関連する触覚イベントデータを決定するために、デコーダモデルによって触覚検知信号を処理することと、対象物に対するロボットハンドのＥＣＳを決定するために、マシ

ンリーニングモデルによって決定された触覚イベントデータを処理することと、を含む。
【００２４】
[0024]本発明の例示的な実施形態は、添付の図面に例として示されており、同様の符号は同じまたは同様の要素を示している。
【図面の簡単な説明】
【００２５】
【図１（ａ）】多層構造体およびその構成要素を示す力センサの側面図である。
【図１（ｂ）】力センサの概略図である。
【図２】触覚センサが垂直力ベクトルおよび接線力ベクトルからなる外部接触力にあるときのエラストマ基板の予想される変形を示す側面図である。
【図３】印加された機械的負荷に起因して電気抵抗が変化する複数の交差導電性ワイヤおよび可撓性導電性材料から構成されるマトリックスピエゾ抵抗センサの層を示す図である。
【図４】磁力線がＮ極（Ｎ）からＳ極（Ｓ）を指し、磁場の強度が磁石からの距離に反比例する、円筒磁石からの代表的な磁場ベクトルを示す図である。
【図５】接触力に対応する磁石を移動させるためのキャリアとして機能する磁石を内側に取り付けることによって磁化される剛性骨構造を示す図である。
【図６】骨構造の層が左への接線接触力（Ｆ）によって印加されている間のエラストマ形状および局所磁場の予想される変化を示す図である。
【図７】骨構造の層が右への接線接触力（Ｆ）によって印加されている間のエラストマ形状および局所磁場の予想される変化を示す図である。
【図８】骨構造の層が上部から垂直接触力（Ｆ）によって印加されている間のエラストマ形状および局所磁場の予想される変化を示す図である。
【図９】ロボットグリッパが力センサと一体化されている力センサの適用例を示す図である。
【図１０】ロボットハンド／人工ハンドが触覚的に検知される指先として力センサと一体化されている力センサの別の適用例を示す図である。
【図１１】ロボットの脚部／人工脚部が触覚的に検知される指先として力センサと一体化されている力センサの別の適用例を示す図である。
【図１２】力センサのＦＡ－Ｉ層としての４×４マトリックスピエゾ抵抗センサと、関連する回路の概略図である。
【図１３】力センサの多層構造および特性評価性能を示す図である。
【図１４】力センサを組み込んだグリッパの指機構構造を示す図である。
【図１５】力センサを組み込んだグリッパのための触覚センシングソリューションおよび信号伝送の概要を示す図である。
【図１６】力センサを組み込んだグリッパの様々な把持構成を示す図である。
【図１７】力センサを組み込んだロボットハンドを示し、ロボットハンドを人間の手と類似させる図である。
【図１８】ロボットハンドの力センサ統合およびデータ伝送を示す図である。
【図１９】ロボットハンドが力で閉じた方法で円筒形状の対象物を把持しているときの人差し指の遠位部分におけるデータ・フロー・グラフを示す図である。
【図２０】９つの支配的なＥＣＳを識別するために使用される触覚検知信号およびＣＮＮアーキテクチャを示す図である。
【図２１】力センサを組み込んだロボットハンドを使用して実施された実験を示す図である。
【図２２】ボールヒット認識を実行するためにＥＣＳ識別能力を適用する実験的設定を示す図である。
【発明を実施するための形態】
【００２６】
[0047]本開示は、触覚力検知のための力センサ（ＧＴａｃもしくはＧＴａｃセンサま

たは触覚センサもしくは触覚力センサとも呼ばれる）に関する。本開示はまた、ＧＴａｃセンサを使用してマトリックス垂直接触力および内部３軸力を測定する方法に関する。ＧＴａｃセンサは、家庭用ロボット用の低コストの生体模倣触覚センサとして機能することができ、ロボット操作の必要性に応じて解決策をカスタマイズすることができる。例えば、ロボットアームには大きな検知領域が設けられ、ロボットの指先には小さな検知領域が設けられてもよい。ＧＴａｃセンサはまた、切断者で安全に制御されるロボット人工装具に組み込まれてもよい。例えば、ＧＴａｃセンサは、その設計の高いセンシング能力、高い拡張性、および低コストのために、下肢人工装具および上肢人工装具に大面積の生体模倣触覚センシング能力を提供するために使用することができる。

【００２７】

[0048]いくつかの例示的な実施形態では、ＧＴａｃは、人間の指先の触覚検知機能を模倣する密な外部垂直力検知および内部３軸力検知能力を分離する。いくつかの例示的な実施形態のＧＴａｃは、マトリックスピエゾ抵抗センサ、磁性骨構造、シリコーンエラストマ基板、およびホール効果センサからなる人間の皮膚に触発された多層構造を採用する。例示的なＧＴａｃセンサは、密な垂直接触力および接触剪断力を推定することができる。ＧＴａｃは、有利には、検知能力、単純さ、感度、堅牢性、およびフォームファクタに関して改善された触覚検知を提供する。

【００２８】

[0049]人間－ロボット／ロボット－環境の相互作用、例えば、対象物操作のためのロボットハンド把持は、接触力の大きさ、接触位置、および力の方向を推定するために触覚センサに依存し、対象物操作の安全性および堅牢性を向上させることができる。したがって、高分解能かつ高次元で接触情報を推定する能力が重要である。

【００２９】

[0050]いくつかの実施形態のＧＴａｃは、豊富な接触情報、すなわち接触力の大きさ、接触力の位置、および接触力の方向を認識する。接触情報は、ロボット／人間とロボットとの相互作用を制御する際の安全性および安定性の向上に有利に寄与する。ロボットは、対象物や人間と対話しながら、対話の状況を能動的に把握し、状況に応じた判断を行うことが求められる。例えば、接触は、ロボットが対象物に触れるときに起こる。接触力の大きさを測定することにより、対象物の運動特性の推定が可能になり、把持対象物の安定性、人間との相互作用の安全性、および対象物の操作の有効性の調整が可能になる。接触位置の測定を使用して、対象物によって加えられる関節レベルトルクを推定することができる。接触力の方向を測定することは、対象物を操作する際の知覚、および操作中の対象物の安定性を推定するのに有用である。

【００３０】

[0051]力センサは、ピエゾ抵抗検知原理とホール効果ベースの検知という２つの検知原理を組み込むことができる。いくつかの実施形態では、力センサは、ピエゾ抵抗センサ、ホール効果センサ、磁石、３Ｄ印刷構造、およびエラストマ基板を含むことができる。外部からの接触力を接触面から力センサの検知構成要素に伝達させるための多層構造を設けてもよい。検出構成要素からの信号を処理して、力センサに加えられる力を決定することができる。いくつかの力センサは、軟質接触面を構築するために使用され、および／または力伝達媒体として機能するエラストマ基板を含むことができる。ピエゾ抵抗センサは、接触力に対応する位置で電気抵抗を減少させることによって、通常の接触力に応答する。ホール効果センサは、磁化された骨構造の外部接触力変化位置によって引き起こされる局所磁場の変化を測定することができる。上記の信号はすべて、力センサに設けられたプロセッサまたはマイクロコントローラによって収集および処理することができる。

【００３１】

[0052]図１（ａ）は、触覚力センサ１００の側面図を示す。側面視において、センサ１００は、多層構造を呈している。上から、接触面は、可撓性（例えば、エラストマまたはエラストマ）基板２ａ（タップエラストマとも呼ばれる）上にある。基板２ａは、接触力に対応して変形し、接触力を次の層、すなわちマトリックスピエゾ抵抗センサ３（垂直

力検知積層体マトリックスとも呼ばれる）に伝達することができる。圧力／機械的歪みは、圧電抵抗センサ３の領域に伝達され、それにより、圧力のある領域で電気抵抗が低減される。加えて、３の電気抵抗は、加えられた圧力で線形化されてもよい。別の可撓性（例えば、エラストマまたはエラストマ）基板２ｂ（平坦なエラストマとも呼ばれる）は、骨構造４ａと呼ばれる構造および基部チャンバ４ｂに取り付けられ、剛体は、ピエゾ抵抗センサ３、骨構造４ａ、および磁石５を含む。したがって、剛体は、加えられた接触力の下で、基部チャンバ４ｂに対して３軸（すなわち、３次元で）の変位を受ける可能性がある。これにより、局所磁場５ａを変化させることができる。特に、磁石５からの局所磁場は、基部チャンバ４ｂを貫通することができなければならず、ホール効果センサ６によって検出されなければならない。使用されるホール効果センサ６は、ＭＬＸ９０３９３集積回路チップ（Ｍｅｌｅｘｉｓ　Ｃｏ．Ｌｔｄ．）、または任意の他の適切なホール効果センサを使用して提供することができる。ホール効果センサ６によって生成された信号は、Ｉ２Ｃバスまたは他の通信バスを介して読み取ることができる。ホール効果センサ６によって生成される出力データは、ｘ－ｙ－ｚ軸における磁気強度値および温度を含む。ホール効果センサ６のデジタル出力は、通常の接触力および剪断接触力の一方または両方を決定するために、Ａｒｄｕｉｎｏ　Ｍｅｇａ２５６０または他のプロセッサ上のＩ２Ｃピンによって読み取られる。

【００３２】

[0053]図１（ｂ）は、触覚力センサの略図を示し、正方形はピエゾ抵抗検知点を示し、円は単位当たりのホール効果検知点または検知領域を示す。

【００３３】

[0054]図２に示すように、対象物１は、２ａの接触面に外力Ｆを加える。エラストマ基板２ａは、変形し、接触力を３上の機械的歪みに伝達し、接触力をエラストマ基板２ｂの変形に伝達することが予想される。特に、４ａの変位ベクトルの方向は、接線接触力ベクトルの方向と整列している。したがって、局所磁場はそれに応じて変化している。

【００３４】

[0055]ＧＴａｃセンサ１００は、そのエラストマ基板２ａ（ヒト皮膚のマイスナー小体に基づいて設計され、高速適応（ＦＡ）－Ｉ層とも呼ばれる）における外部配列された（４×４マトリックス）垂直接触力を推定することができる。エラストマ基板２ａの厚さは、０．５ｍｍであってもよい。センサ１００は、骨構造層４ａ（人間の皮膚のラフィニ柱に基づいて設計され、低速適応（ＳＡ）－ＩＩ層とも呼ばれる）における３軸総接触力を測定することができる。この機能において、骨構造層４ａは、層２ｂおよび４ｂと協調して動作する。ＳＡ－ＩＩ層は、３ｍｍの厚さまたは任意の他の適切な厚さであってもよい。ＦＡ－Ｉ層およびＳＡ－ＩＩ層の両方における関節レベルのトルクは、外部接触力が最上層２ａに加えられたときの既知の幾何学的寸法に基づいて推定することができる。より具体的には、ＧＴａｃは、通常の外因性接触力を抵抗の低減に変換し、総３軸力を局所的な磁束密度変化に変換する。抵抗および局所磁束密度は、ピエゾ抵抗センサおよびホールセンサを独立して同時に使用して測定される。各ＧＴａｃセンサ１００は、ＦＡ－Ｉ層から１６個（４×４マトリックス）およびＳＡ－ＩＩ層から３個からなる１９個の触覚信号を取得することができる。

【００３５】

[0056]不均一な力のフィードバック

ＧＴａｃの接触位置推定は、以下のように各検出点での検出圧力の加重平均によって得ることができる。

【数１】

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{r=1}^{4} \sum_{c=1}^{4} (e \cdot c \cdot R^{r,c})/16 \\ \sum_{r=1}^{4} \sum_{c=1}^{4} (e \cdot r \cdot R^{r,c})/16 \end{bmatrix} (1)$$

式中、$R^{r、c}$は、行ｒおよび列ｃにおけるＦＡ－Ｉ層からの信号読み取り値であり、

ｅは、ＦＡ－Ｉ層の空間分解能であり、例えば、ｅ＝２．５ｍｍである。ヒトの皮膚柔軟性と同様に、外部接触力は、接触面上のエラストマ基板を変形させることができる。このエラストマは、鋭い接触の場合の圧力を機械的に緩衝し、その後に、機械的歪みのために電気抵抗が低減されたＦＡ－Ｉ層に接触面から圧力を送達する。さらに、接触力が骨構造に伝達され、平坦なエラストマを基部チャンバに対して変形させる。したがって、骨構造は、局所的な磁束密度を変化させながら、ホール効果センサに対して３軸に沿って移動することができる。局所磁束密度のこの変化は、ホールセンサによって測定することができ、剪断接触力を推定するために使用することができる。ＧＴａｃ上の力検知の組成の表現は、ＦＡ－ＩおよびＳＡ－ＩＩ信号のハイブリッド結果である。３軸接触力とＧＴａｃ検知信号との間の線形関係は、以下のように表すことができる。

【数２】

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x \Delta B_x + b_x \\ k_y \Delta B_y + b_y \\ k_z (a \Delta B_z + (1-a) \sum_{r=1}^{4} \sum_{c=1}^{4} R^{r,c}) + b_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、ΔＢｘ、ｙ、ｚ、ｋｘ、ｙ、ｚ、およびｂｘ、ｙ、ｚは、それぞれ３軸における線形フィッティングラインの初期化位置、勾配、および切片に対する局所磁束密度の観察された変化である。変数ａに関して、ＦＡ－Ｉ層およびＳＡ－ＩＩ層はｚ軸に冗長な力検知自由度（ＤｏＦ）を有するので、垂直力推定値の冗長性は、ＦＡ－Ｉ層およびＳＡ－ＩＩ層によって重み付けすることができ、すなわち式（２）の

【数３】

$$F_z = k_z (a \Delta B_z + (1-a) \sum_{r=1}^{4} \sum_{c=1}^{4} R^{r,c}) + b_z$$

であり、

【数４】

$$\sum_{r=1}^{4} \sum_{c=1}^{4} R^{r,c}$$

は４×４行列のアレイ化されたＦＡ－Ｉ信号の合計である。

【００３６】

[0057]製造およびカスタマイズ

図１３は、生体模倣触覚センサＧＴａｃ　１３００を示す。の設計は、多層構造を採用している。ＧＴａｃ　１３００ユニットは、可撓性基板（例えば、タップエラストマ１３１０）、平坦なエラストマ１３５０、ピエゾ抵抗センサ積層体（４×４）１３２０、ポリラクチド骨構造１３３０、円筒ネオジム（ＮｄＦｅＢ）磁石または他の磁石１３４０、基部チャンバ１３８０、および統合ホールセンサ１３７０を有するＰＣＢからなる。配列された垂直力検知積層体、すなわちピエゾ抵抗センサ１３２０は、第１の層を形成し、その一方の側にエラストマ基板１３１０が軟質接触面として配置される。積層体の他方の側は、円筒形のＮｄＦｅＢ磁石１３４０を取り付けることによって磁化された剛性骨構造１３３０である次の層に取り付けられる。この層の下には、ホール効果センサ１３７０を一体化する基部チャンバ１３８０に取り付けられた平坦なエラストマ基板１３５０がある。エラストマ基板１３１０、１３５０はいずれも、弾性率８３ｋＰａの特注の型に入れた液体シリコーンゴム（Ｅｃｏｆｌｅｘ　００－５０、Ｓｍｏｏｔｈ－Ｏｎ　Ｉｎｃ．）を流延および乾燥（１２時間）することによって作製した。ＧＴａｃの両方の層は、異なる目的のために様々な形状にカスタマイズすることができる。ＧＴａｃのカスタマイズ可能な変

数には、ＦＡ－Ｉ層の圧電抵抗器、骨構造、強磁性マーカー、ＳＡ－ＩＩ層のエラストマならびにＰＣＢが含まれた。すべての層は、接着剤、例えば、シアノループシアノアクリレート（Ｅｌｅｃｔｒｏｌｕｂｅ　Ｃｏ．Ｌｔｄ）を用いて互いに貼り合わせることができる。ポリラクチド骨構造およびカスタマイズされた鋳型は、ＰＬＡ　Ｗｈｉｔｅ（Ｕｌｔｉｍａｋｅｒ　Ｃｏ．Ｌｔｄ．）を使用してＵｌｔｉｍａｋｅｒ　Ｓ５によって印刷することができた。各構成要素の他の材料を所望に応じて使用することができ、提案された材料は例示のみを目的としている。ホールセンサは、ＭＬＸ９０３９３集積回路チップ（Ｍｅｌｅｘｉｓ　Ｃｏ．Ｌｔｄ．）であった。ＭＬＸ９０３９３　Ｑｗｉｉｃ磁力計（ＳｐａｒｋＦｕｎ　Ｃｏ．Ｌｔｄ．）を特性評価実験に使用した。

【００３７】

[0058]図３において、マトリックスピエゾ抵抗センサ３は、ピエゾ抵抗材料３ａおよび導電性ワイヤ３ｂからなる。ピエゾ抵抗材料３ａは、印加された機械的歪みによって電気抵抗が変化するＶｅｌｏｓｔａｔ／Ｌｉｎｑｓｔａｔを含むことができる。導電性ワイヤ３ｂは、ピエゾ抵抗センサ３を異なる形状に変形させることができるように可撓性にすることができ、これは良好に適合する接触面を構築するのを助けることができる。導電性ワイヤ３ｂは、格子を形成するために行および列を横切って送られてもよい。しかしながら、ピエゾ抵抗材料で構成された積層体は、行および列のワイヤの間にあるため、ワイヤのいずれも直接接触していない。

【００３８】

[0059]図４は、シリンダ磁石５が、その強度が磁石からの距離に反比例する磁場５ａを生成することを示す。特に、他の形状の磁石が使用されてもよいが、円筒は半径方向に均一な磁場を提供するように選択されており、任意の横方向に特定の量だけ変位すると、ホールセンサで磁場が一貫して予測可能に変化する。図５は、骨構造の層が図２の局所磁場５ａを変化させるために磁石と共に移動することができるように、磁石５を取り付けることによって剛性骨構造４ａが磁化されることを実証する。任意の極は、上面または底面であり得る。骨構造の形状は、矩形に限定されない。図６、図７および図８は、骨構造４ａの側面および上部に外力Ｆが加えられた場合に、エラストマの形状がどのように変化すると予想されるかを示す。これにより、エラストマ２ｂが変形して磁石５が移動する。したがって、局所磁場５ａは外力Ｆに応答することができる。

【００３９】

[0060]地球磁場相殺

ＳＡ－ＩＩ層の検出原理は磁束密度測定に基づくため、２つの主な原因、地球の磁場および隣接する磁場からの磁気外乱（ｄ）がある。いくつかの実施形態のＧＴａｃは、地球磁場相殺を低減するためのＩＭＵベースの方法を組み込んでいる。磁気擾乱を定量化するために、そのような実施形態は、信号対雑音比（ＳＮＲ）の代替的な定義をＳＮＲ＝ｓ／（ｓ＋ｄ）として使用し、ここでｓは有効信号強度である。地球の磁場は、環境内の一定のベクトル（B_e）であるが、最初は未知である（ホールセンサを介してその磁束密度の変化を観察することができる）。したがって、それはセンサ観測（B_s）に含まれ、すなわち$B_s = B_e + B_m$であり、ここでB_mはＧＴａｃ内の磁石の磁場である。したがって、$B_m = B_s - B_e$であり、接触力推定はB_m、すなわち$F = f(B_m) = f(B_s - B_e)$にのみ関係する。したがって、解決策は、$B_e$を決定し、接触力推定のためにそれを減算することである。回転行列の行列乗算を使用して、方向R_{ab}後の新しい座標における接触ベクトルq_bは、$q_a = R_{ab} q_b$を使用して取得することができる。したがって、$\Delta q = q_a - q_b = (R_{ab} - I) q_b$である。したがって、環境$B_{e|b}$における地球の磁場の定数ベクトルは、最小二乗最適化によって線形方程式を解くことによって得ることができる。

【数５】

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{B}_s = (\mathbf{R}_{ab} - \mathbf{I})\mathbf{B}_{e|b} \\ \mathbf{B}_{e|b} = [(\mathbf{R}_{ab} - \mathbf{I})^T(\mathbf{R}_{ab} - \mathbf{I})]^{-1}(\mathbf{R}_{ab} - \mathbf{I})^T \Delta \mathbf{B}_s \end{cases} \quad (4)$$

ここで、R_{ab}は回転行列であり、慣性測定ユニット（ＩＭＵ）または角度エンコーダを介して取得することができ、ΔB_sはセンサによって観測された磁束密度変化である。

【００４０】

[0061]図９は、把持などのフィードバックベースのタスクの性能を改善するための豊富な接触フィードバックをロボットに提供するためのロボットグリッパ１０１と一体化された力センサの例示的な適用を示す。触覚センサ１００は、密な垂直接触力および３軸接触力を推定することができる。１００の接触面は、適合する把持接触を有するために、別の指の触覚センサ１００の接触面に面してもよい。本発明の用途は、グリッパの指と一体化することを含むが、これに限定されない。

【００４１】

[0062]図１０および図１１は、触覚力センサのいくつかの実施形態を利用する本発明の２つの例示的な用途を示す。この実施形態では、触覚力センサ１００は、上肢人工装具／擬人化ロボットハンドおよびアーム１０２ならびに下肢人工装具１０３と一体化されている。触覚センサ１００は、アーム／シャンク上の無意識の衝突のフィードバックを提供し、対象物を落下させないように操作するときの安定性を把握することによって、上肢／下肢人工装具の人間とロボットとの相互作用の安全性を高めるために使用することができる。検知能力の側面から、触覚センサは、マトリックスピエゾ抵抗センサからの信号およびホール効果センサからの信号を出力することができ、最終出力は、２つの信号の両方の混合結果である。外部接触位置および３軸力は、それぞれ２つの信号から推定することができるので、最終混合信号を使用して、各指先の関節レベルのトルクを推測することができる。人工装具／ロボットハンド１０２の手のひら、人工装具／ロボットアーム１０２、および人工装具シャンクなどのより広い領域の触覚センシングが必要な場合、本発明の原理を拡張することができる。そのような場合、マトリックスピエゾ抵抗センサおよびホール効果センサの空間分解能は、それに応じて調整されるべきである。上記で説明した実施形態のほとんどは、マトリックスピエゾ抵抗センサに関するものであるが、静電容量センサ、圧電センサ、摩擦電気センサ、光学センサまたは他の同様のセンサを使用してそのような触覚力センサを開発するために同じ原理を適用することもできる。

【００４２】

[0063]データ取得および処理

図１２（ａ）は、マトリックスピエゾ抵抗センサの読み出し回路を示す。図１２（ｂ）は、フォロアベースの信号分離回路を示す。Ｒｓは［５ｋ，１００ｋ］オームの抵抗R_sの範囲を有するピエゾ抵抗センサであり、R_0は１０ｋオームである。図１２のマトリックスピエゾ抵抗センサを読み出すための回路には、所定の時間間隔で行を高電圧に切り替える４チャネルマルチプレクサがある。ボルテージフォロワとして機能し、他の外乱源からのアナログ読み出しを分離するために、１０ｋオームのプルアップ抵抗を有する４つの演算増幅器がある。４チャネルマルチプレクサは、Ａｒｄｕｉｎｏ　Ｍｅｇａ２５６０の４つのデジタルＩ／Ｏピンに接続されている。信号は、４つのアナログＩ／Ｏピンによって直接読み取られる。

【００４３】

[0064]各瞬間に１つの行のみがＶｒｅｆに接続されてもよい。残りの行は、グラウンド（ＧＮＤ）に短絡される。ＧＴａｃセンサの力検知原理に関して、各ＧＴａｃは１６個のＦＡ－Ｉ信号および３個のＳＡ－ＩＩ信号を取得することができる。ＧＴａｃセンサのＳＡ－ＩＩ層内のホールセンサは全体的な磁束密度（ＭＦＤ）を測定するので、相対的なＭＦＤ変化$\Delta B_{x、y、z}$は、初期N_0個のサンプル$B^{N_0}{}_{x、y、z}$の平均値から測定されたＭＦＤ　$B_{x、y、z}$を減算することによって得ることができ（N_0は３００として設定することができる）、すなわち

【数６】

$$\Delta B_{x,y,z} = B_{x,y,z} - B_{x,y,z}^{N_0}/N_0.$$

である。信号のノイズを低減するために、移動平均を加算して、ウィンドウサイズが６のすべての信号をフィルタリングすることができる。

【００４４】

[0065]制御戦略

いくつかの実施形態は、各グリッパにＧＴａｃセンサが設けられた２つ以上の指状グリッパに関することができる。脆弱な対象物を把持するために一体化されたＧＴａｃを有する２つの指グリッパを使用して閉ループ把持を達成するために、しきい値Ｔｇを使用して、グリッパの各指先にＧＴａｃからのフィードバックを介して指によって加えられる把持力を制御する。対象物を把持するために、各指ｆの対応するモータm_fを１増分（１．５°）回転させてラックアンドピニオンギヤを駆動し、利用されたＧＴａｃ信号$g_f > T_g$まで指閉鎖を行う。活用されたＧＴａｃシグナルは、以下によって導き出すことができる。

【数７】

$$g_f = \sqrt{\Delta B_f^{x2} + \Delta B_f^{y2} + \left[a\Delta B_f^{z} + (1-a)\sum_{r=1}^{4}\sum_{c=1}^{4} R_f^{r,c}\right]} \quad (5)$$

ここで、ｆ＝１は左指、ｆ＝２は右指である。ピンセットでは、ピンセット把持実験のために、T_{ghigh}＝９００、T_{glow}＝５００およびａ＝０．３として使用実験値を設定した。$g_1 < T_{ghigh}$および$g_2 < T_{ghigh}$である場合、$g_1 > T_{ghigh}$および$g_2 > T_{ghigh}$になるまで両指が閉じ始めた。２秒後に、両指は対象物を離し始めたが、$g_1 < T_{glow}$および$g_2 < T_{glow}$になるまでピンセットを保持した。卵把持実験では、Ｔｇを７００、ａを０．３とした。

【００４５】

[0066]ＧＴａｃ－グリッパ：触覚検知を有する再構成可能な動作不足マルチ・フィンガ・ロボットグリッパ

本開示のいくつかの実施形態は、より広範囲の対象物に関する。したがって、本明細書に提示されるのは、指および手のひらに一体化された再構成可能な機構および触覚センサ（ＧＴａｃ）を有するロボットグリッパである。グリッパは、ＧＴａｃ－グリッパとも呼ばれ得る。ＧＴａｃ－グリッパの各指は、２ＤＯＦ未作動設計および中手指節（ＭＣＰ）関節を有する１つまたは複数、現在は２つの指骨から構成され得る。４本の適応指を備えたＧＴａｃ－グリッパは、５つの把持構成を実行し、１５０Ｈｚで２２８個の触覚フィードバック信号（垂直力および剪断力）を得ることができる。グリッパは、様々な日常の対象物を把持し、閉ループ制御によって並進および回転を含む手元操作を達成することができる。Ｙａｌｅ－ＣＭＵ－Ｂｅｒｋｅｌｅｙ（ＹＣＢ）ベンチマーク評価では、グリッパは合計で９３％（円形対象物）、０％（平坦対象物）、７８％（ツール）、９０％（関節対象物）、および６５％のスコアを達成した。ＧＴａｃ－グリッパは新しいハードウェア設計を提供し、家庭および産業分野における様々なロボット用途に有益であり得る。

【００４６】

[0067]グリッパ設計

２本の指骨を有する指には、２ＤＯＦリンク駆動の非作動設計を採用した。図１４（ａ）に示すように、平行四辺形機構を有する４バー機構を積み重ねることによって未作動機構を構築した。他の構成も可能であり、本教示の範囲内に入ることが意図されている。作

動リンクｌ１は、サーボモータに接続されている。１－ＤＯＦ平行四辺形機構では、アクティブリンクＡＢの回転がリンクＯ１Ｃの動きに伝達され、これにより２－ＤＯＦ未作動４節リンク機構Ｏ１ＣＤＯ２が作動する。

【００４７】

[0068]関節Ｏ２内の予荷重ねじりばねＴは、遠位指骨を完全に伸長した状態に維持するために使用される。機械的ストッパは、指骨に外力が加えられていないとき、遠位指骨をばねの伸長下で整列させたままにした。関節Ｏ０は、人間の手の中手指節関節として機能し、各指が手のひらの中心軸に対して独立して向きを変えることを可能にする。指が屈曲するときの指先の軌跡は、外的制約によって決定される。図１４（ｂ）は、指屈曲中の３つの状況を示す。＃１では、接触は中節骨で起こる。＃２では、２つの指骨が剛体として動作し、固定点の周りを回転する。＃３では、屈曲前に指を押したときに、指先が直線的に移動する。

【００４８】

[0069]図１４（ｃ）は、ＧＴａｃ－グリッパの部分分解図を示す。指の遠位節骨、指の中節骨、および手のひらに一体化された触覚センサを備えた、４本の指および８個のモータを有する。各指は、指の屈曲／伸展のための１つのモータと、再配向のための１つのモータとを有する。ＧＴａｃセンサの軟質シリコーン皮膚は、指表面を部分的に覆い、対象物把持中の把持安定性を改善する構造的コンプライアンスを提供した。

【００４９】

[0070]ＧＴａｃ－グリッパの操作範囲および器用さを評価するために作業スペース分析が実行される。関節Ｏ１およびＯ２の動きは、非作動の指の設計のために結合される。指先の到達可能な作業空間を分析するために、指先の動作範囲は、未作動特性に起因する機械的限界に依存すると仮定した。したがって、指運動学モデルをＲＲＲ機構として構成し、座標を配置してＤｅｎａｖｉｔ－Ｈａｒｔｅｎｂｅｒｇ（ＤＨ）パラメータを得た。図１４（ｄ）に示すように、各指は、X_0Y_0平面内の関節Ｏ０の周りを１８０°回転することができる。リンクＯ１ＣおよびリンクＯ２Ｄは、それぞれX_1Y_1平面で８５°およびX_2Y_2平面で７０°の動作範囲を達成することができる。指のＤＨパラメータを表Ｉに列挙し、式（６）および（７）によって使用して指先の作業空間を取得することができる。変換行列を以下のように定義した。

【数８】

$$ {}^{0}_{3}T = {}^{0}_{1}T\,{}^{1}_{2}T\,{}^{2}_{3}T \quad (6) $$

と

【数９】

$$ {}^{i-1}_{i}T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7) $$

【表１】

リンク ｉ	a_{i-1}［ｍｍ］	α_{i-1}［度］	d_i［ｍｍ］	θ_i（関節限界［度］）
１	１４．２	９０	４０．２	ｑ＿１（－４５－１３５）
２	０	０	４２	ｑ＿２（５０－１３５）
３	０	０	２９．２	ｑ＿３（２２．５－９２．５）

表Ｉ－指の標準ＤＨパラメータ
モンテカルロ数値アルゴリズムを適用して、各指先の作業空間を求めた。
【００５０】
[0071]触覚センサの統合
ＧＴａｃセンサは、手によって加えられる接触力を測定するために適切な位置に統合される。現在、これらの位置は、図１５に示すように、各指の末節骨および中節骨、ならびにＧＴａｃ－グリッパの手のひらにある。各ＧＴａｃセンサは、複数の触覚検知信号、ここでは１９の触知検知信号（ＦＡ－Ｉ層から１６、ＳＡ－ＩＩ層から３）を知覚することができる。例えば、１２個のＧＴａｃセンサを備えたＧＴａｃ－グリッパは、１５０Ｈｚで２２８個の触覚検知信号を取得することができる。各ＧＴａｃセンサでは、前面の中央に配置されたホールセンサ（ＭＬＸ９０３９３）を使用して、局所磁束密度を取得し、例えばＩ２Ｃバスでデジタル信号を送信する。マルチチャネル演算増幅器、現在は４チャネル演算増幅器（ＭＣＰ６００４）は、圧電抵抗器からアナログ信号を取得するために使用される。ＧＴａｃ－グリッパの４本の指には４つの並列検知分岐がある。アップロードするマルチプレクサ信号、ダウンロードするデジタルおよびアナログ信号、ならびに電源（５Ｖ）は、各分岐でシリアルに送信される。遠位節骨（ｓ＝２）、中節骨（ｓ＝１）、および手のひら（ｓ＝０）にそれぞれＧＴａｃセンサを接続するために、１２ピン、１６ピン、および２０ピンの０．５ｍｍピッチのジャンパケーブルが使用される。
【００５１】
[0072]多用途の把持構成
指基部間の指間距離は、特に未作動機構の精密把持（ピンチ）およびケージ化におけるグリッパの安定性および把持／操作能力に関連する。同様に、グリッパは、そのＭＣＰ関節を連続的に制御して、異なる把持構成を達成し、指間距離を変更することができる。図１６（ａ）に示すように、４つの異なる指間距離ｐｌ、ｐｗ、ｄ、およびｄ／２がある。５つの把持構成は、異なる指間距離で達成することができる（図１６（ｂ））。グリッパは、球状または不規則な対象物のケージ把持（＃１）、円筒状の対象物または小さな対象物の平行ピンチ（＃２および＃３）、把持の安定性を強調したクラスポーズ（＃４）、およびドリルなどのＴ字形対象物のＴ字形把持（＃５）を実行することができる。
【００５２】
[0073]ＧＴａｃ－Ｈａｎｄ：統合された生体模倣触覚センシングおよびＥＣＳ認識機能を備えたロボットハンド
いくつかの実施形態は、手の指および手のひらから触覚フィードバックを得るための一体化されたＧＴａｃセンサを有するロボットハンドに関する。そのような実施形態は、ＧＴａｃ－Ｈａｎｄと呼ばれることがある。ＧＴａｃ－Ｈａｎｄは、２８５個の触覚測定を提供し得る。ＧＴａｃ－Ｈａｎｄは、繊細な対象物を把持し、人間のようなパターニングおよび学習モデルを介してそれらのＥＣＳ（外部接触状態）を正確に識別することができ、これは、繊細な対象物把持、対象物ハンドオーバ、およびボールヒット認識などの困難なタスクを実行するためにロボットに使用することができる。
【００５３】
[0074]いくつかの実施形態では、ＧＴａｃ－Ｈａｎｄは、（ｉ）人間の皮膚のような垂直力（分布）および剪断力（グロス）検知能力を有する触覚センサ、ならびに（ｉｉ）人間の体性感覚システムのものなどの効果的な感覚解釈方法を提供する。図１７は、ＧＴａｃ－Ｈａｎｄ　１７００を示し、ＧＴａｃ－Ｈａｎｄの構造および動作を人間の手と類似させる。ＧＴａｃ－Ｈａｎｄ　１７００は、把持された対象物の９つの典型的なＥＣＳをリアルタイムで識別することができる擬人化ロボットハンドの指および手のひらにＧＴａｃを統合している。ＧＴａｃ－Ｈａｎｄは、ＧＴａｃ－Ｈａｎｄによって生成されたセンサデータ上で動作する人間のようなパターニングおよびディープラーニングモデルを介して保持された対象物のＥＣＳを識別することができる。人間の感覚モータコントローラと同様に、ＧＴａｃ－Ｈａｎｄは、把持された対象物の識別されたＥＣＳに従って、閉ループ把持および対象物ハンドオーバなどの困難なタスクを実行することができる。

【００５４】
[0075]ＧＴａｃ－Ｈａｎｄのメカトロニクス設計
ＧＴａｃ－Ｈａｎｄは、手首の検知および作動のための電子機器を統合する。図３に示すように、２つのＰＣＢがあり、１つのＰＣＢは、ＧＴａｃ検知ＰＣＢからの信号を収集するために使用され、もう１つのＰＣＢは、電源、作動ＰＣＢに使用される。検知ＰＣＢは、各ＧＴａｃ－ｆｉｎｇｅｒ分岐に対して５つの２０ピンのジャンプケーブルコネクタを有することができる。マイクロコントローラ、Ｔｅｅｎｓｙ　４．１は、デジタルデータを生成するために検知ＰＣＢに直接接続され、モータの低レベルコントローラとして機能し、コア処理ユニットと通信するためにシリアルポートおよびＣＡＮバスを開く。
【００５５】
[0076]擬人化手は、図１８（ｄ）に示すように作動不足であり、ケーブル駆動されてもよく、１０個の回転関節が６個のモータによって作動される。形状、サイズ、運動学、および外観は、人間の手のものと同様である。ロボットハンドは、ハンド内のすべての電子機器および作動伝達を統合する。人差し指、中指、薬指、および小指は、遠位部分の長さが異なることを除いて同じ設計を有し、２つの回転関節、すなわち近位指節間関節および中手指節関節を有する。把持および操作のために作動される関節の冗長性を低減するために、遠位および中節骨が指ごとに接続される。親指には、人間のような器用さと機械的な相乗効果を得るために、２つの自由度、すなわち手根中手関節の半径方向外転／内転と、中手指節関節の屈曲／伸展が与えられる。
【００５６】
[0077]信号取得および処理
ＧＴａｃセンサの特徴によれば、ＧＴａｃ－Ｈａｎｄは、指および手のひらから２８５の触覚信号を取得することができる。１５０Ｈｚにおいてすべての信号を取得することができる検知ＰＣＢ。まず、３００サンプルを収集し、テール１００サンプルの平均値（
【数１０】

$$\bar{X}$$

、０．６７秒データ）を計算して、ＧＴａｃ信号を初期化することができる。触覚信号の相対値は、平均値
【数１１】

$$\bar{X}$$

を減算することによって取得することができる。信号のノイズを低減するために、移動平均（ウィンドウサイズ：６）を加算することができる。フィルタリング・アルゴリズムは、ＧＴａｃのＳＡ－ＩＩ信号に対する磁気擾乱を低減するために実施され得る。信号処理アルゴリズムは、閉ループ把持段階でのみ使用された。各ＧＴａｃユニットのＦＡ－ＩおよびＳＡ－ＩＩデータの両方の２つのしきい値を使用して、接触状態を推定することができる。利用されたＦＡ－Ｉシグナル、
【数１２】

$$\tilde{g}_{s,f|FA-I} = \sum_{r=1}^{4} \sum_{c=1}^{4} R_{s,f}^{r,c}, \text{ or SA-II signals}$$

またはＳＡ－ＩＩシグナル、
【数１３】

$$\left|\tilde{g}_{s,f|SA-II}\right| = \sqrt{\Delta B_{s,f}^{x\,2} + \Delta B_{s,f}^{y} + \Delta B_{s,f}^{z}}$$

のいずれかがしきい値（Ｔ１およびＴ２）を上回った場合、指ｆの切片ｓを接触させたと見なした。ＳＡ－ＩＩシグナルは、応答指部分が接触しているときにのみ有効であった。したがって、グローバル座標に対する指の向きによる磁束密度の変化は、接触が検出されない場合には破棄された。データ処理のための擬似コードは、アルゴリズム１に記載されている。

【表２】

Algorithm 1 GTac signal processing

INITIALIZATION
$i = 0$
while $i < N_0$ **do**
$g_i{}^{raw} = readout()$
$i = i + 1$
$\bar{X} = \sum_{i=-L_1/3}^{-1} g_i{}^{raw}/(L_1/3)$
MAIN LOOP
while true do
$g^{raw} = readout()$
$\hat{g} = g^{raw} - \bar{X}$ (initialised signals)
put $\hat{g}$ in tail of moving average g^6, then
$\tilde{g} = \sum g^6/6$, (filtered signals).
if $\tilde{g}_{s,f|FA-I} < T_1$ and $|\tilde{g}_{s,f|SA-II}| < T_2$ then
$\tilde{g}_{s,f|SA-II} = 0$

【００５７】

[0078]パターン化および学習モデル

ＧＴａｃの特性に基づいて、１５個のＧＴａｃユニット（ＧＴａｃ＃＝ｆ×４＋ｓ，ｆ∈｛０，１，２，３，４｝、ｓ∈｛０，１，２｝）からの２４０個のＦＡ－Ｉ型信号および４５個のＳＡ－ＩＩ型信号からなる２８５個の触覚検知信号を１５×１９の信号行列（特徴＃：０－１８）に変換した。ＧＴａｃのシグナル伝達スキームによれば、ニューロンに触発された触覚表現を符号化することは、ＧＴａｃが各指部において同期した時間精度を維持しながらＦＡ－Ｉ型およびＳＡ－ＩＩ型の両方の触覚信号を組み込むことができるので、その中での実装に適している。図１９に示すように、人間の体性感覚システムＧＴａｃ－Ｈａｎｄにいくつかのデコーダを組み込んで生体模倣触覚情報を抽出し、分散ＦＡ－Ｉ信号

【数１４】

$$(SR = \sum_{r=1}^{4} \sum_{c=1}^{4} R^{r,c})$$

を組み込み、ＦＡ－ＩおよびＳＡ－ＩＩ信号（ＳＦＡ$^{x，y，z}$＝ΔＢ$^{x，y，z}$／ＳＲ）を統合し、ｎ番目のサンプリング時点での動的時間変化速度

【数１５】

$$dFA = SR_n - SR_{n-1}\ dSA^{x,y,z} = \Delta B_n^{x,y,z} - \Delta B_{n-1}^{x,y,z}$$

を取得し、触覚イベントを生成することによって、神経触覚パターン表現によって着想を得た。

【００５８】

[0079]対応する層の触覚イベントは、時間変化速度が所定のしきい値内の境界を超えたときに捕捉され、３軸でＦＡ－Ｉ層については｜Ｆ｜＝２０、ＳＡ－ＩＩ層については｜Ｓⁱ｜＝２０，ｉ∈｛ｘ，ｙ，ｚ｝であった。抽出された触覚情報は、各指部分から独立していた。したがって、それらをセクションごとの特徴（ＳＷＦ）と呼んだ。図２０（ａ）に示すように、モデルは、１０個のデコーダ出力と、元の１９個のＧＴａｃ信号を有する機械学習ベースの分類器のオプションの入力（ｗ／ＳＷＦまたはｗ／ｏＳＷＦ）としての４つの触覚イベントとからなる１４個のＳＷＦを含んでいた。図２０に示すように、全体で３３チャネルのデータ、すなわち平坦化されたＲｒ、ｃ（特徴＃：０－１５）、ΔＢｘ、ｙ、ｚ（特徴＃：１６－１８）、ｘｅおよびｙｅ（特徴＃：１９－２０）、ＳＲ（特徴＃：２１）、ｄＦＡ（特徴＃：２２）、ＳＦ　Ａｘ、ｙ、ｚ（Ｆｅａｔｕｒｅ＃：２３－２５）、ｄＳＡｘ、ｙ、ｚ（特徴＃：２６－２９）および触覚イベント（特徴＃：３０－３３）があった。

【００５９】

[0080]教師あり学習モデル訓練および検証：触覚フィードバックを介して９つのＥＣＳを識別するために、２つの教師あり学習モデル、すなわち畳み込みニューラルネットワーク（ＣＮＮ）および二次判別分析（ＱＤＡ）を実装した。ＴｅｎｓｏｒＦｌｏｗに基づくＰｙｔｈｏｎのＫｅｒａｓライブラリを使用して、ＣＮＮベースのモデルを構築および訓練することができる（図２０（ｂ））。ＣＮＮモデルの複雑さ（訓練可能なパラメータの数）を低減し、その性能（検証精度）を維持するためにＣＮＮモデルのパラメータを調整した後に、２つの主な畳み込みブロック、０．５の「ドロップアウト」レートで調整された平坦化層、および完全接続高密度層からなるアーキテクチャが実施形態によって提供された。各畳み込みブロックは、非線形性を導入するために、３×３の畳み込みカーネル、正規化線形ユニット（ＲｅＬＵ）、および２×２の最大プーリング層によって組み立てられた。入力オプションｗ／ｏＳＷＦおよびｗ／ＳＷＦについて、それぞれ２１２１および２９８５の訓練可能なパラメータがＣＮＮモデルにあった。学習プロセス中、Ａｄａｍオプティマイザを使用して学習率を０．００１、バッチサイズを１２とし、モデルを１５エポックで訓練した。性能をＣＮＮベースのモデルと比較するために、ＱＤＡベースの分類器は、ベイズの定理に基づいて特徴空間内のクラス間の二次決定境界を決定するｓｃｉｋｉｔ－ｌｅａｒｎライブラリを使用して実装された。ＱＤＡモデルの構成はデフォルト構成であった。教師あり学習モデルを検証するために、５倍交差検証を実施し、データセットをランダム化後に５つの等しい断片に分割し、４つの断片を使用してモデルを訓練し、残りの１つを使用して訓練されたモデルを検証した。この推定プロセスを５回繰り返した。

【００６０】

[0081]図２１（ａ）は、ＧＴａｃ－Ｈａｎｄの制御ループにおける４つの段階を示す。図２１（ｂ）は、学習済みＮＮ－ＥＣＳモデルおよびハンドオーバコントローラを使用した卵の把持およびハンドオーバの実験を示す。

【００６１】

[0082]図２２（ａ）は、ボールヒット認識を実行するためにＥＣＳ識別能力を適用する実験的設定を示す。図２２（ｂ）は、一試行実験の認識結果および復号された触覚イベント表現を示す。図２２（ｃ）は、行われたボールヒット認識実験の６回の試行すべての認識精度を示す（合計６０回の試行にわたって９６．７％の精度）。

【００６２】

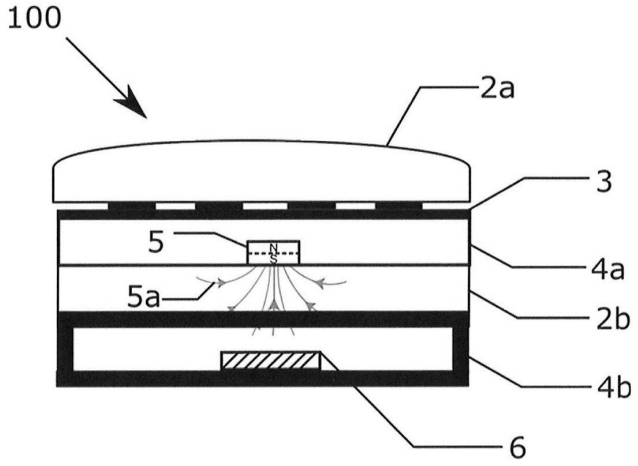
[0083]本明細書における任意の先行する刊行物（またはそれに由来する情報）または任意の既知の事項への言及は、その先行する刊行物（またはそれに由来する情報）または既知の事項が、本明細書が関連する努力の分野における共通の一般知識の一部を形成することの承認または許可または任意の形態の示唆として解釈されるべきではなく、そのように解釈されるべきではない。

【００６３】

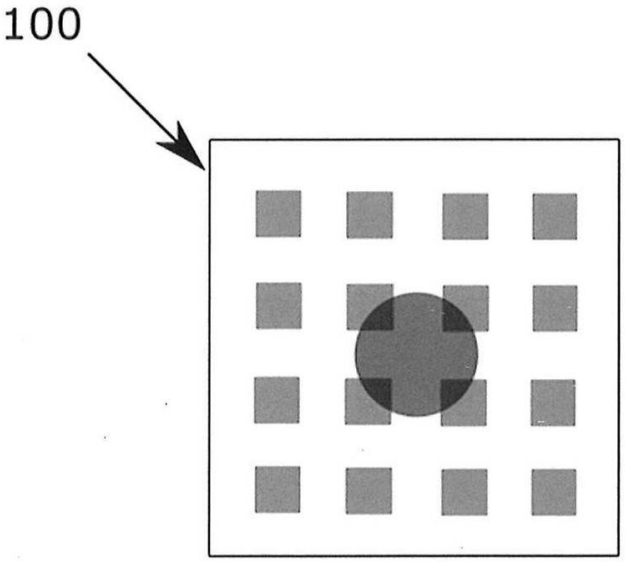
[0084]本開示の範囲は、当業者が理解するであろう、本明細書に記載または図示した例示的な実施形態に対するすべての変更、置換、変形、変更、および修正を包含する。本開示の範囲は、本明細書に記載または図示した例示的な実施形態に限定されない。さらに、本開示は、特定の構成要素、要素、特徴、機能、動作、またはステップを含むものとして本明細書のそれぞれの実施形態を説明および図示しているが、これらの実施形態のいずれも、当業者が理解するであろう本明細書のどこかに記載または図示されている構成要素、要素、特徴、機能、動作、またはステップのいずれかの任意の組み合わせまたは順列を含むことができる。本開示は、特定の利点を提供するものとして特定の実施形態を説明または例示しているが、特定の実施形態は、これらの利点のいずれも、いくつか、またはすべてを提供しなくてもよい。

【図面】

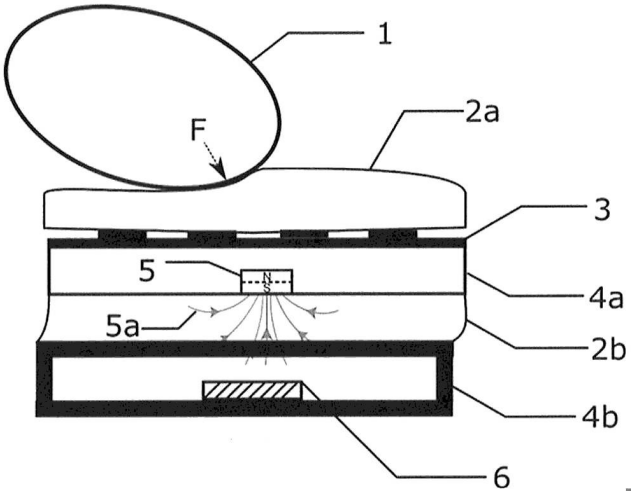
【図１（ａ）】



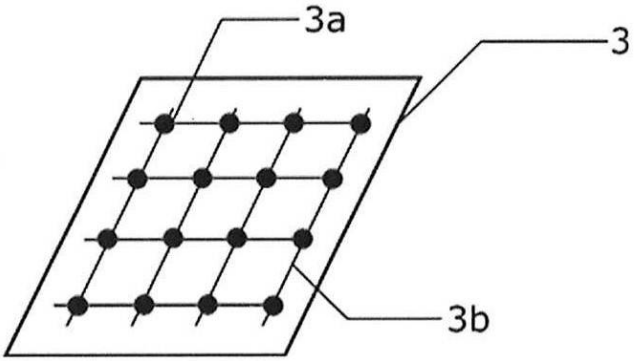
【図１（ｂ）】



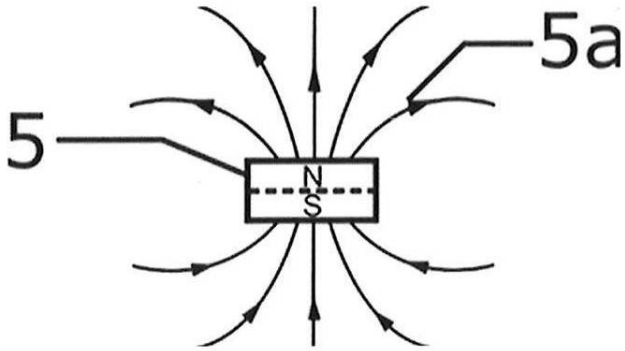
【図２】



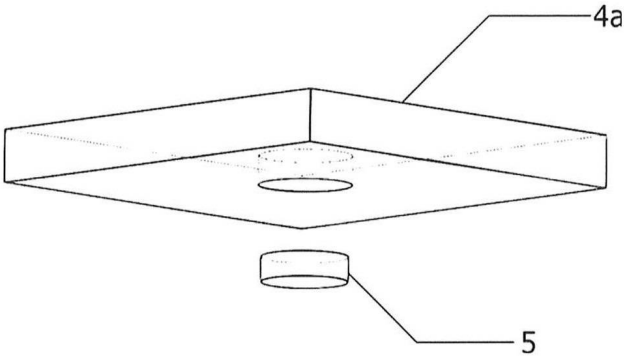
【図３】



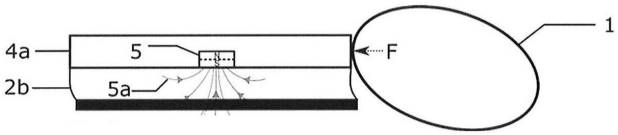
【図４】



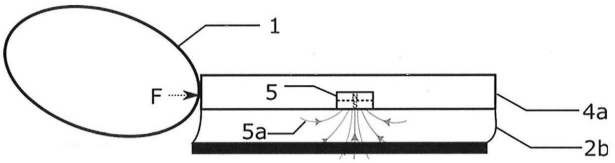
【図５】



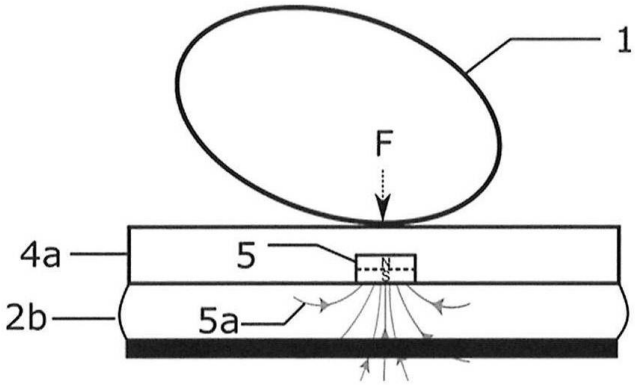
【図６】



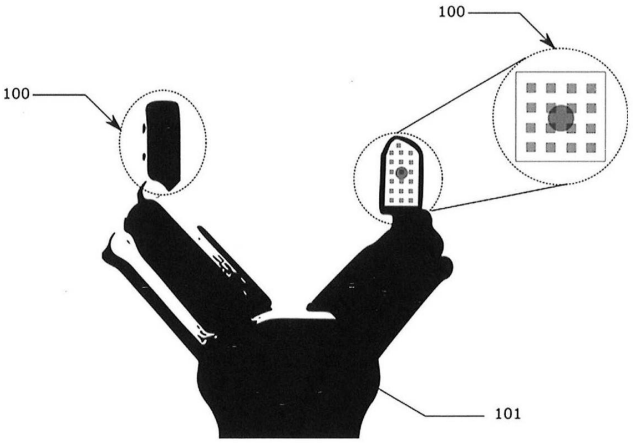
【図７】



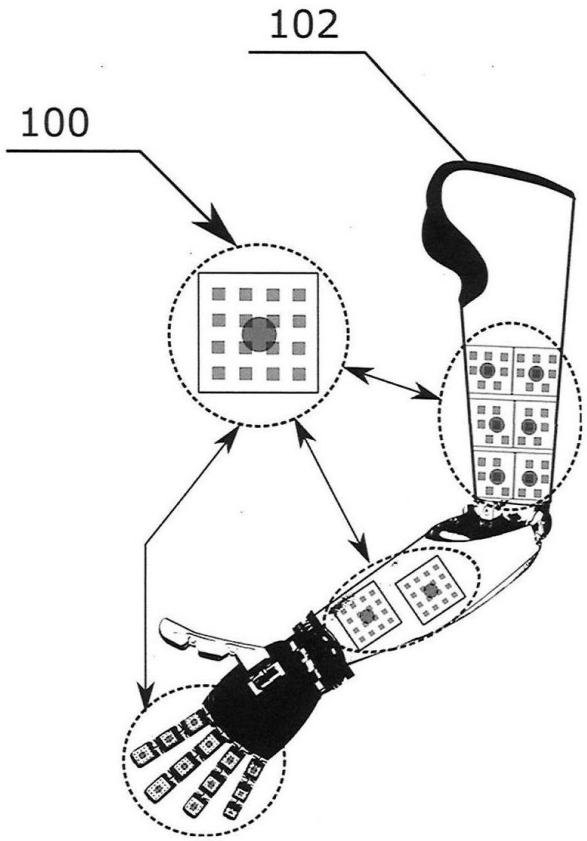
【図８】



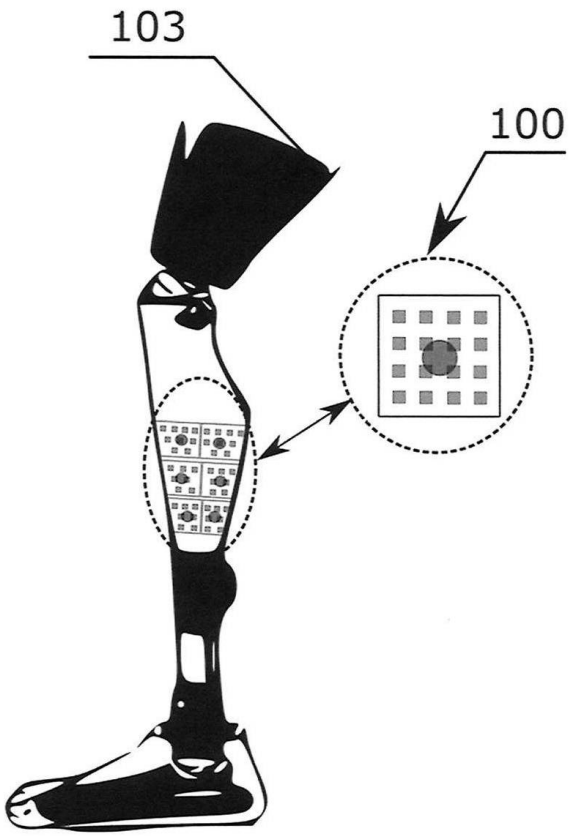
【図９】



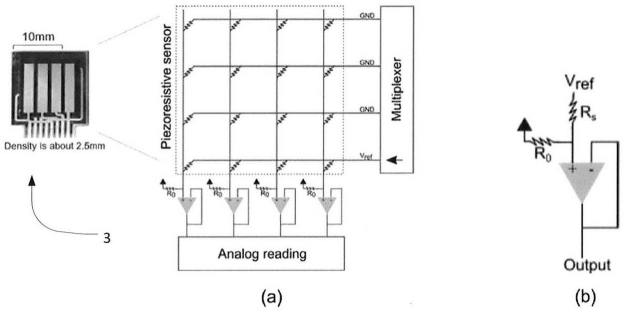
【図１０】



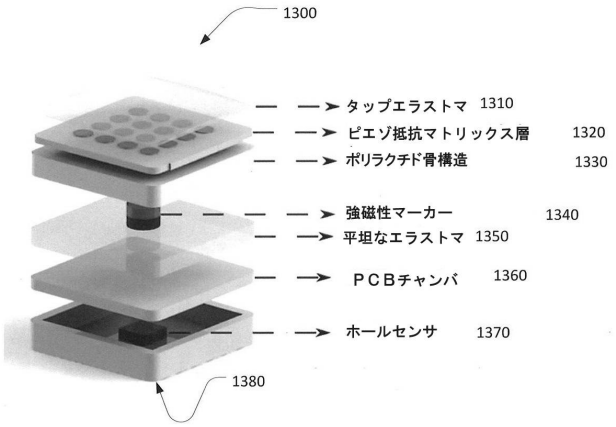
【図１１】



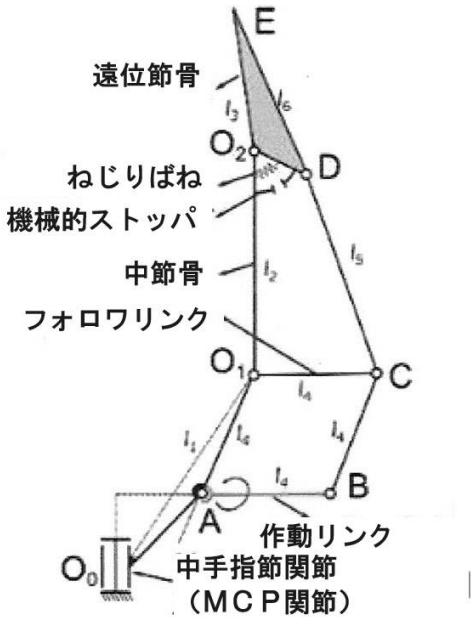
【図１２】



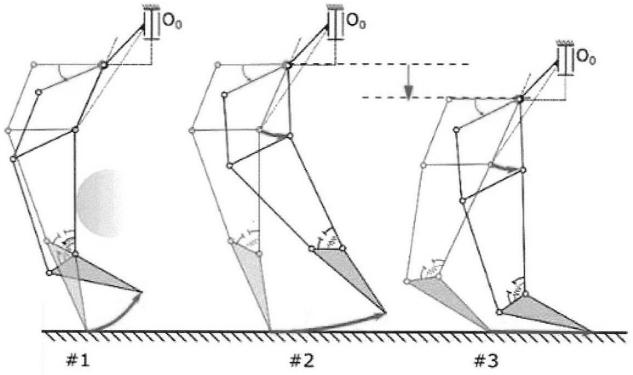
【図１３】



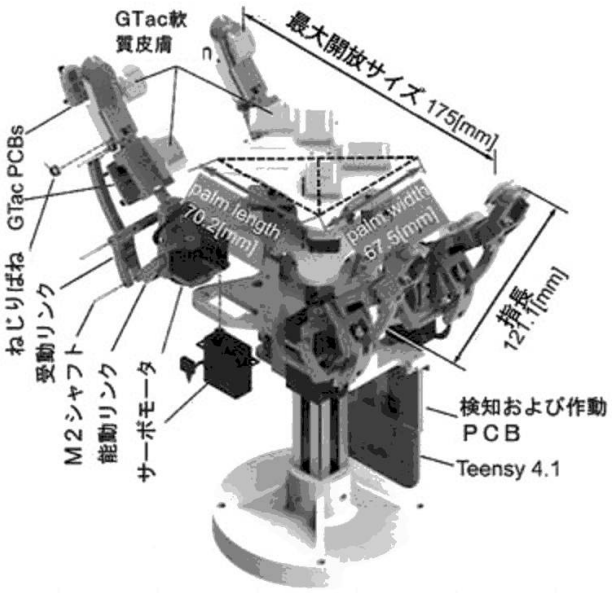
【図１４（ａ）】



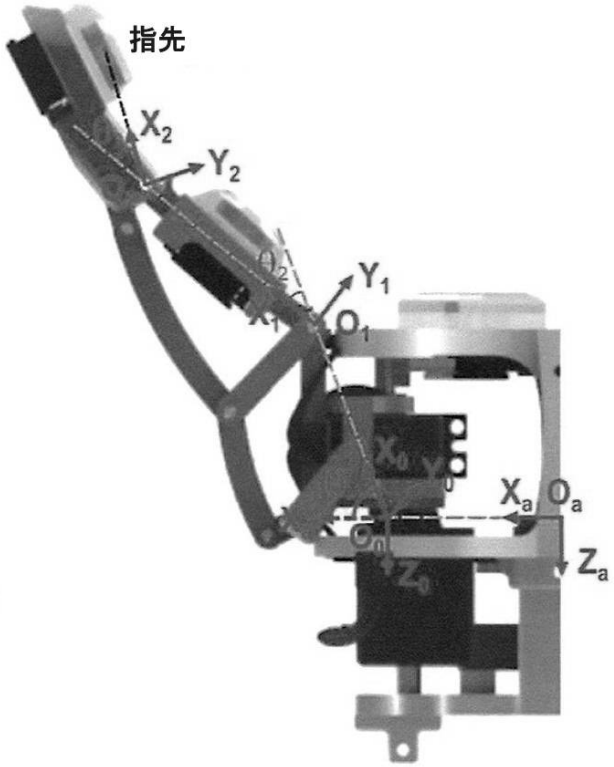
【図１４（ｂ）】



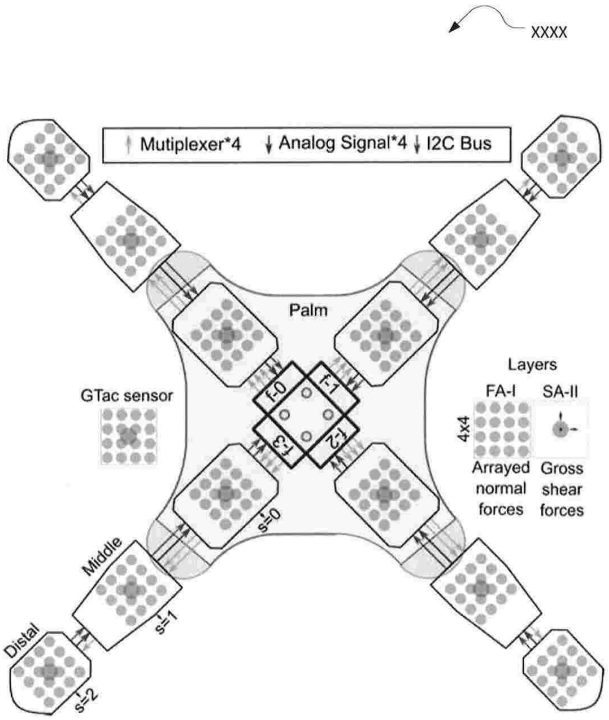
【図１４（ｃ）】



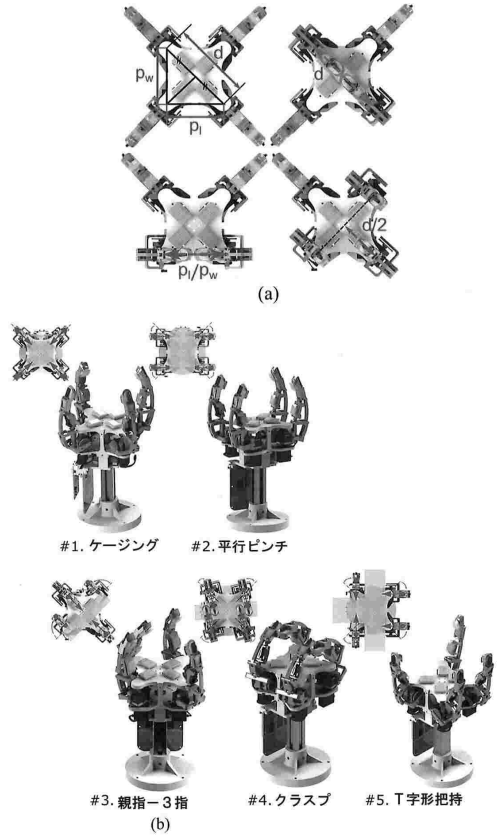
【図１４（ｄ）】



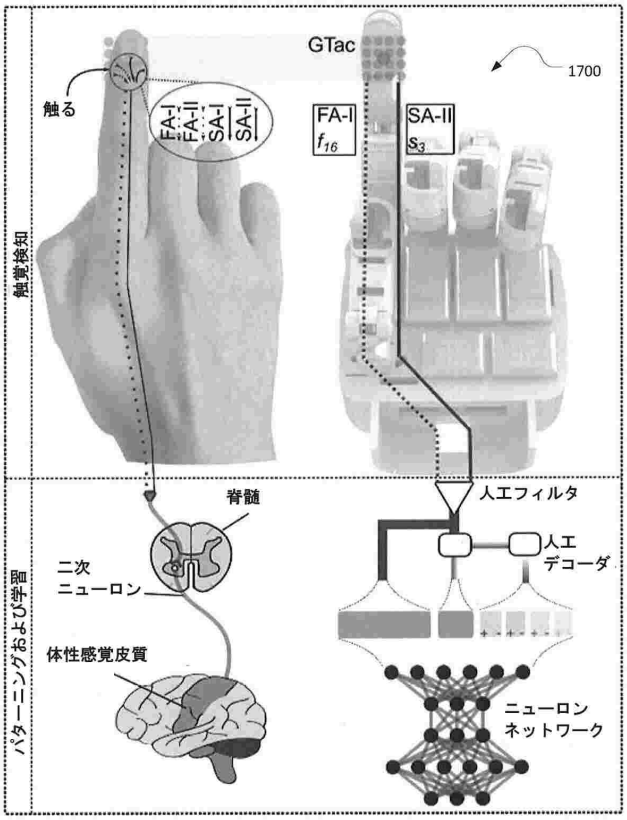
【図１５】



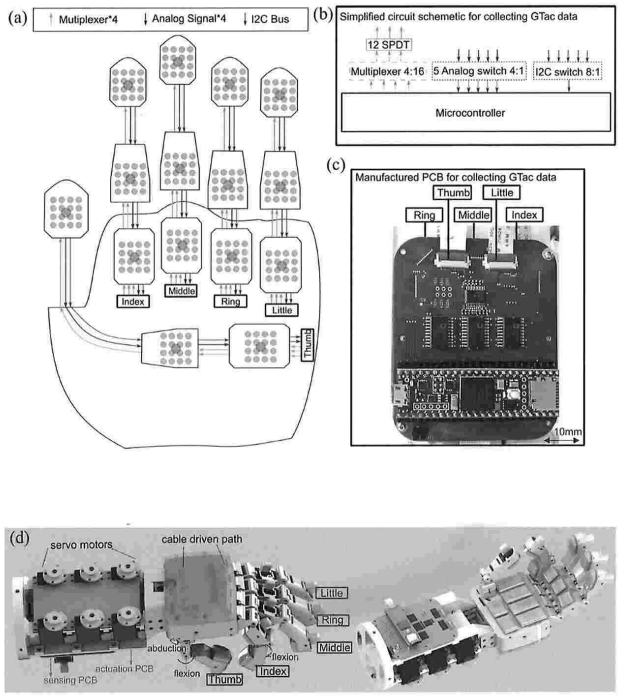
【図１６】



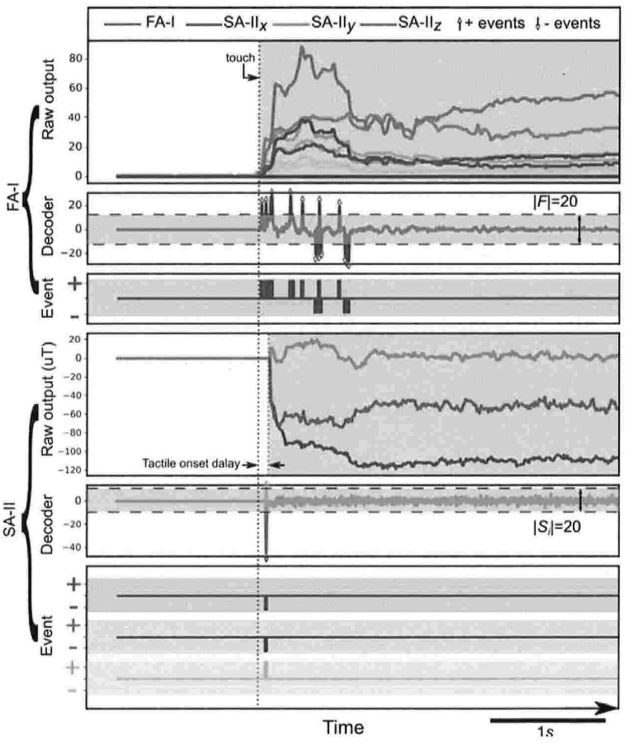
【図１７】



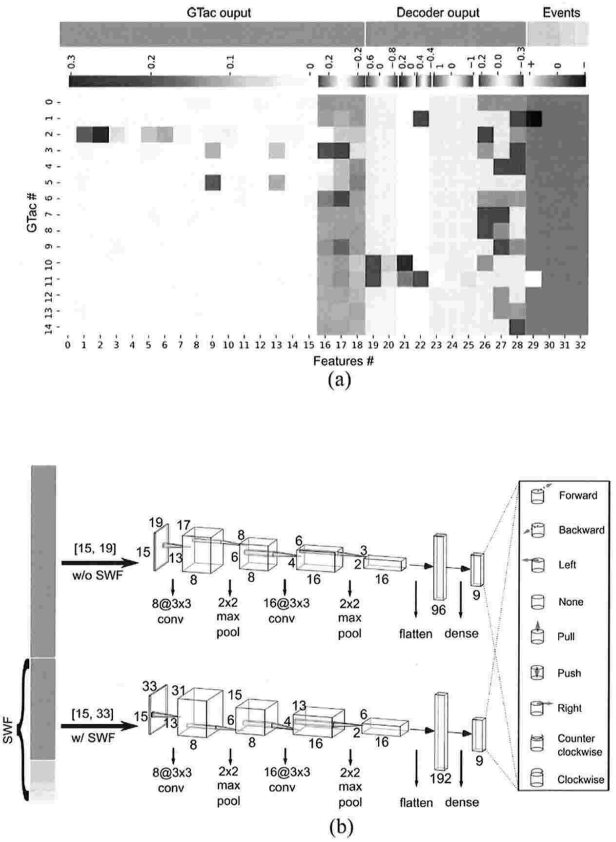
【図１８】



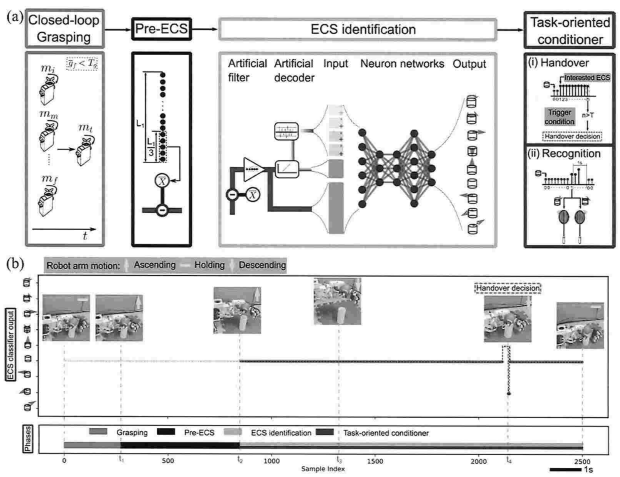
【図１９】



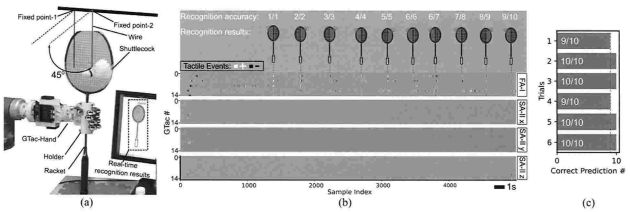
【図２０】



【図２１】


(a)
Closed-loop Grasping
Pre-ECS
ECS identification
Task-oriented conditioner
Artificial filter
Artificial decoder
Input
Neuron networks
Output
(i) Handover
Interested ECS
Trigger condition
Handover decision
(ii) Recognition
(b)
Robot arm motion:
Ascending
Holding
Descending
Handover decision
ECS classifier output
Phases
Grasping
Pre-ECS
ECS identification
Task-oriented conditioner
Sample Index
1s

【図２２】


Fixed point-1
Fixed point-2
Wire
Shuttlecock
45°
GTac-Hand
Holder
Racket
Real-time recognition results
(a)
Recognition accuracy:
Recognition results:
Tactile Events:
FA1
SA1-1
SA1-2
SA2
GTac #
Sample Index
1s
(b)
Trials
Correct Prediction #
9/10
10/10
10/10
9/10
10/10
10/10
(c)

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/SG2022/050387

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01L 5/16 (2020.01) *G01L 1/22 (2006.01)* *B25J 13/08 (2006.01)*

According to International Patent Classification (IPC)

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01L, B25J

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

FAMPAT, Google Scholar: force, tactile, haptic, touch, robotic, sensor, detector, measurement, normal, vertical, press, orthogonal, shear, lateral, displacement, tri-axial, translational, deformable, elastomeric, piezoelectric, magnetic, Hall effect, fast, slow, response, machine learning, neural network and related terms.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2018/0073942 A1 (WU, X. A. ET AL.) 15 March 2018 Para. [0042]-[0056], Fig. 2-3	1-21
X	US 2012/0247226 A1 (MUROYAMA, M. ET AL.) 4 October 2012 Para. [0069]-[0071], [0095], [0139]-[0153], Fig. 1, 6-8	1-18
X	JP 2006-208248 A (UNIV TOKYO) 10 August 2006 Para. [0017]-[0021], Fig. 1-3 of the machine translation	1-18
A	YAN, Y. ET AL., Soft magnetic skin for super-resolution tactile sensing with force self-decoupling, *Science Robotics*, 24 February 2021, Vol. 6, No. 51, pages 1-12 [Retrieved on 2023-01-10] <DOI: 10.1126/SCIROBOTICS.ABC8801> Whole document	

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.

*Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"D" document cited by the applicant in the international application

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
13/01/2023 *(day/month/year)*	18/01/2023 *(day/month/year)*
Name and mailing address of the ISA/SG **Intellectual Property Office of Singapore** 1 Paya Lebar Link, #11-03 PLQ 1, Paya Lebar Quarter Singapore 408533 Email: pct@ipos.gov.sg	Authorized officer Fang Zheng (Dr) IPOS Customer Service Tel. No.: (+65) 8339 8616

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 2019)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/SG2022/050387

Box No. II Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 2 of first sheet)

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1. ☐ Claims Nos.:
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:

2. ☐ Claims Nos.:
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:

3. ☐ Claims Nos.:
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

Please refer to Supplemental Box (Continuation of Box No. III).

1. ☐ As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.

2. ☒ As all searchable claims could be searched without effort justifying additional fees, this Authority did not invite payment of additional fees.

3. ☐ As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:

4. ☐ No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

Remark on Protest
☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest and, where applicable, the payment of a protest fee.
☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest but the applicable protest fee was not paid within the time limit specified in the invitation.
☐ No protest accompanied the payment of additional search fees.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/SG2022/050387

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	LARSON, C. ET AL., A Deformable Interface for Human Touch Recognition Using Stretchable Carbon Nanotube Dielectric Elastomer Sensors and Deep Neural Networks. *Soft Robotics*, 4 October 2019, Vol. 6, No. 5, pages 611-620 [Retrieved on 2023-01-10] <DOI: 10.1089/SORO.2018.0086> Abstract	
A	PARK, J. ET AL., Fingertip skin–inspired microstructured ferroelectric skins discriminate static/dynamic pressure and temperature stimuli. *Science Advances*, 30 October 2015, Vol. 1, No. 9, pages 1-13 [Retrieved on 2023-01-10] <DOI: 10.1126/SCIADV.1500661> Whole document	
P,X	WO 2022/111799 A1 (MAX PLANCK GESELLSCHAFT [DE]) 2 June 2022 Pg. 2, 9, 13-14, 17, Fig. 1, 9,	22-23

Form PCT/ISA/210 (continuation of second sheet (1)) (July 2019)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/SG2022/050387

Note: This Annex lists known patent family members relating to the patent documents cited in this International Search Report. This Authority is in no way liable for these particulars which are merely given for the purpose of information.

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2018/0073942 A1	15/03/2018	NONE	
US 2012/0247226 A1	04/10/2012	CN 102713546 A TW 201113130 A WO 2011/045837 A1 KR 20120098684 A EP 2490004 A1	03/10/2012 16/04/2011 21/04/2011 05/09/2012 22/08/2012
JP 2006-208248 A	10/08/2006	NONE	
WO 2022/111799 A1	02/06/2022	NONE	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/SG2022/050387

Supplemental Box
(Continuation of Box No. III)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

Group I: claims 1-21 are directed to a force sensor comprising: a contact arrangement for transmitting a contact force to a force sensor assembly the force sensor assembly comprising: a first sensor sensing, and producing an output from, a normal contact force component of the contact force; and a body moveable on transmission of the contact force to the force sensor assembly; and a second sensor for sensing, and producing an output from, a relative displacement of the body relative to the second sensor, a tri-axis contact force being determined from the relative displacement.

Group II: claims 22-23 are directed to a computer implemented method for identification of extrinsic contact states (ECSs) of a robotic hand with respect to an object, the method comprising: receiving tactile sensing signals from each finger section of the robotic hand, the tactile sensing signals comprising fast-adapting (FA) response signals and slow-adapting (SA) response signals; processing the tactile sensing signals by a decoder model to determine tactile event data associated with each finger section of the robotic hand; processing the determined tactile event data by a machine leaning model to determine an ECS of the robotic hand with respect to the object.

Please refer to **Box No. IV** of Written Opinion of The International Searching Authority (Form PCT/ISA/237) for detailed explanation.

フロントページの続き

MK,MT,NL,NO,PL,PT,RO,RS,SE,SI,SK,SM,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,KM,ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AO,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BH,BN,BR,BW,BY,BZ,CA,CH,CL,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DJ,DK,DM,DO,DZ,EC,EE,EG,ES,FI,GB,GD,GE,GH,GM,GT,HN,HR,HU,ID,IL,IN,IQ,IR,IS,IT,JM,JO,JP,KE,KG,KH,KN,KP,KR,KW,KZ,LA,LC,LK,LR,LS,LU,LY,MA,MD,ME,MG,MK,MN,MW,MX,MY,MZ,NA,NG,NI,NO,NZ,OM,PA,PE,PG,PH,PL,PT,QA,RO,RS,RU,RW,SA,SC,SD,SE,SG,SK,SL,ST,SV,SY,TH,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,US,UZ,VC,VN,WS,ZA,ZM,ZW

（特許庁注：以下のものは登録商標）

１．ＴＥＮＳＯＲＦＬＯＷ

２．ＰＹＴＨＯＮ

シンガポール共和国 １１９０７７ シンガポール，ロウアー ケント リッジ ロード ２１，ナショナル ユニバーシティ オブ シンガポール内，ファカルティー オブ エンジニアリング，デパートメント オブ バイオメディカル エンジニアリング

(72)発明者 ユ，ハオヨン

シンガポール共和国 １１９０７７ シンガポール，ロウアー ケント リッジ ロード ２１，ナショナル ユニバーシティ オブ シンガポール内，ファカルティー オブ エンジニアリング，デパートメント オブ バイオメディカル エンジニアリング

Ｆターム（参考） 2F051 AA10 AB03 AB05 AB06 BA05 BA07 DA03

3C707 AS38 ES06 HS27 JS06 KS31 KS33 KV04 KV11 KW03 LW12 XK03 XK12 XK17