

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2010-58260

(P2010-58260A)

(43) 公開日 平成22年3月18日(2010.3.18)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
B 2 5 J 13/00 (2006.01)	B 2 5 J 13/00	3 C 0 0 7
B 2 5 J 5/00 (2006.01)	B 2 5 J 5/00	F

審査請求 有 請求項の数 13 O L (全 35 頁)

(21) 出願番号 特願2008-302457 (P2008-302457)
 (22) 出願日 平成20年11月27日(2008.11.27)
 (31) 優先権主張番号 10-2008-0085922
 (32) 優先日 平成20年9月1日(2008.9.1)
 (33) 優先権主張国 韓国(KR)

特許法第30条第1項適用申請有り [研究集会名]
 2008年度IEEE(電気電子学会)計算機知能に関する世界大会 [主催者名] IEEE(電気電子学会)
 [開催日] 平成20年6月1日～6日

(71) 出願人 591074116
 韓国科学技術研究院
 KOREA INSTITUTE OF
 SCIENCE AND TECHNOLOGY
 大韓民国 136-791 ソウル 城北
 区 下月谷洞 39-1
 39-1 Hawolgok-dong,
 Seongbuk-gu, Seoul 1
 36-791 KOREA

(74) 代理人 100083806
 弁理士 三好 秀和

(74) 代理人 100095500
 弁理士 伊藤 正和

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 進化アルゴリズムと模倣学習に基づくロボットの動作制御方法

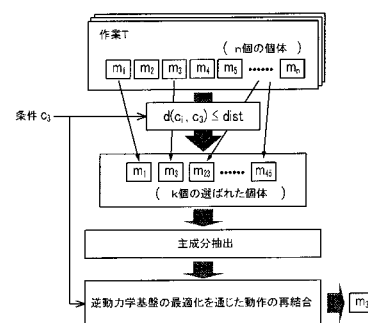
(57) 【要約】

【課題】ロボットが人間の動作を学習できる進化アルゴリズムに基盤したロボットの動作制御方法を提供する。

【解決手段】本発明は進化アルゴリズムを利用したロボットの動作制御方法に関するものである。本発明は人間の動作パターンを収集してデータベースを構築する段階と、主成分分析及び逆動力学基盤の補間法を利用した遺伝演算子を利用して前記データベースを進化させる段階と、前記進化したデータベースを利用してリアルタイムでロボットの動作を生成する段階を含むロボットの動作制御方法を提供する。

本発明によると進化したデータベースを利用してロボットが人間の運動を学習し、最適化した動作をリアルタイムで制御することができる。

【選択図】図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

ロボットの動作制御方法において、

(a) 人間の動作パターンを収集してデータベースを構築する段階；

(b) 主成分分析及び逆動力学に基づいた補間法を利用した遺伝演算子を利用して前記データベースを進化させる段階；及び

(c) 前記進化したデータベースを利用してリアルタイムでロボットの動作を生成する段階を含むことを特徴とするロボットの動作制御方法。

【請求項 2】

前記 (a) 段階は人間の動作をモーションキャプチャーする段階を含むことを特徴とする、請求項 1 に記載のロボットの動作制御方法。

10

【請求項 3】

前記 (b) 段階は、

(b-1) ロボットが行う任意の動作と類似の動作状態を有する基本動作を前記データベースから 1 つ以上選択する段階；及び

(b-2) 主成分分析による主成分抽出及び前記主成分の結合を通じて最適動作を新たに生成することによって、前記選択された基本動作を再加工する段階を含むことを特徴とする、請求項 1 に記載のロボットの動作制御方法。

【請求項 4】

前記 (b) 段階は、

20

前記 (b-1) 段階と前記 (b-2) 段階を繰り返して行って前記データベースを進化させる段階を含むことを特徴とする、請求項 3 に記載のロボットの動作制御方法。

【請求項 5】

前記 (b-1) 段階で、

前記任意の動作は、

【数 1】

$$q(t)$$

を前記任意の動作の関節角軌跡、

30

【数 2】

$$q_{mean}(t)$$

を前記選択された基本動作の平均関節角軌跡、

【数 3】

$$q_{pc_i}(t)$$

40

を前記選択した基本動作の関節角軌跡の中で i 番目主成分軌跡、

【数 4】

$$x_i(i=1,2,3,4,5)$$

をスカラー係数とすると、

【数 5】

$$q(t) = q_{mean}(t) + \sum_{i=1}^4 x_i q_{pc_i}(t) + x_5 \quad (1)$$

という式(1)で示されることを特徴とする、請求項3に記載のロボットの動作制御方法。

【請求項6】

前記任意の動作の動作状態は、

10

【数6】

$$q_0$$

を開始時間

【数7】

$$t_0$$

における関節角、

20

【数8】

$$\dot{q}_0$$

を開始時間

【数9】

$$t_0$$

30

における関節角速度、

【数10】

$$q_f$$

を終了時間

【数11】

$$t_f$$

40

における関節角、

【数12】

$$\dot{q}_f$$

を終了時間

【数13】

$$t_f$$

50

における関節角速度とすると、

【数 1 4】

$$q(t_0) = q_0, \quad q(t_f) = q_f, \quad \dot{q}(t_0) = \dot{q}_0, \quad \dot{q}(t_f) = \dot{q}_f$$

という式 (2) に示す境界条件を満足することを特徴とする請求項 5 に記載のロボットの動作制御方法。

【請求項 7】

前記 (b - 2) 段階で、

前記選択された基本動作が 1 つ以上の関節角軌跡を含む時、前記関節角軌跡の平均軌跡

【数 1 5】

$$(q_{mean})$$

を、k を選択した基本動作の数とし、

【数 1 6】

$$q_i$$

を i 番目基本動作の関節角軌跡とすると、

次の式 (3) によって計算し、

【数 1 7】

$$q_{mean} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k q_i \quad (3)$$

さらに、次の式 (4) を通じて共分散行列 (S) を計算し、

【数 1 8】

$$S = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (q_i - q_{mean})(q_i - q_{mean})^T \quad (4)$$

この共分散行列から固有ベクターを得て、前記固有ベクターの中で前記関節角軌跡の主成分軌跡を得ることを特徴とする、請求項 3 に記載のロボットの動作制御方法。

【請求項 8】

前記 (b - 2) 段階で、

【数 1 9】

$$q$$

を前記選択された基本動作の関節角、

【数 2 0】

$$\dot{q}$$

を前記選択された基本動作の関節角速度、

10

20

30

40

50

【数 2 1】

$$\ddot{q}$$

を前記選択された基本動作の関節角加速度、

【数 2 2】

$$M(q)$$

を質量マトリックス、

10

【数 2 3】

$$C(q, \dot{q})$$

をコリオリベクターとし、

【数 2 4】

$$N(q, \dot{q})$$

が重力及びその他の力を含むとき、次の式(5)を通じて前記選択された基本動作の関節
トルク

20

【数 2 5】

$$(\tau)$$

を決め、

【数 2 6】

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + N(q, \dot{q}) = \tau$$

(5)

30

前記決められた関節トルクが、次の式(6)を最小にすると、

【数 2 7】

$$\frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \|\tau(q, \dot{q}, \ddot{q})\|^2 dt$$

(6)

40

前記選択された基本動作を前記最適動作に決めることを特徴とする、請求項3に記載の
ロボットの動作制御方法。

【請求項9】

前記(c)段階は、

主成分分析及び機構学的補間を通じた動作の再結合方法を利用することを特徴とする請
求項1に記載のロボットの動作制御方法。

【請求項10】

前記(c)段階は、

(c-1)ロボットが生成する動作と類似の動作状態を有する基本動作を前記進化した

50

データベースから１つ以上選択する段階；及び

(c-2) 主成分分析による主成分抽出及び前記主成分の結合を通じて最適動作を新たに生成することによって、前記選択された基本動作を再加工する段階を含むことを特徴とする、請求項 9 に記載のロボットの動作制御方法。

【請求項 11】

前記 (c-1) 段階で、

前記ロボットが生成する動作は、

【数 28】

$$q(t)$$

10

を前記ロボットが生成する動作の関節角軌跡、

【数 29】

$$q_{mean}(t)$$

を前記選択された基本動作の平均関節角軌跡、

【数 30】

$$q_{pc_i}(t)$$

20

を前記選択された基本動作の関節角軌跡の中で i 番目主成分軌跡、

【数 31】

$$x_i(i=1,2,3,4)$$

をスカラー係数とすると、

【数 32】

$$q(t) = q_{mean}(t) + \sum_{i=1}^3 x_i q_{pc_i}(t) + x_4$$

30

(7)

という式 (7) で示すことができることを特徴とする、請求項 10 に記載のロボットの動作制御方法。

【請求項 12】

前記ロボットが生成する動作の動作状態は、

【数 33】

$$q_0$$

40

を開始時間

【数 34】

$$t_0$$

における関節角、

【数 3 5】

$$\dot{q}_0$$

を開始時間

【数 3 6】

$$t_0$$

10

における関節角速度、

【数 3 7】

$$q_f$$

を終了時間

【数 3 8】

$$t_f$$

20

における関節角、

【数 3 9】

$$\dot{q}_f$$

を終了時間

【数 4 0】

$$t_f$$

30

における関節角速度とすると、

【数 4 1】

$$q(t_0) = q_0, \quad q(t_f) = q_f, \quad \dot{q}(t_0) = \dot{q}_0, \quad \dot{q}(t_f) = \dot{q}_f \quad (8)$$

という式(8)で示す境界条件を満足することを特徴とする、請求項11に記載のロボットの動作制御方法。

【請求項13】

前記(c-2)段階で、

前記選択された基本動作が1つ以上の関節角軌跡を含む時、前記関節角軌跡の平均軌跡

40

【数 4 2】

$$(q_{mean})$$

は、kを選択した基本動作の数とし、

【数 4 3】

$$q_i$$

をi番目基本動作の関節角軌跡とするときに、

50

次の式 (9) によって計算され、
【数 4 4】

$$q_{mean} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k q_i \quad (9)$$

さらに、次の式 (1 0) を通じて共分散行列 (S) を計算し、
【数 4 5】

$$S = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (q_i - q_{mean})(q_i - q_{mean})^T \quad (10)$$

10

前記共分散行列から固有ベクターを得て、前記固有ベクターの中で前記関節角軌跡の主成分軌跡を得ることを特徴とする、請求項 1 0 に記載のロボットの動作制御方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明はロボットの動作制御方法に関し、特に、進化アルゴリズムを利用してロボットに人間の動作を学習させた後、リアルタイムでロボットの動作を制御する方法に関するものである。

20

【背景技術】

【0 0 0 2】

最近の人間型ロボットは機構的構造や外形だけでなく、歩くことや走ることなどのような動作制御能力においても人間に近くなっている。それはロボットに人間の動作と類似な動作を行うようにする試みが続いているためである。

【0 0 0 3】

例えば、人間の動作をデータベースに貯蔵し、貯蔵された動作をロボットが再現することによって人間の動作を模倣させることもできる。しかし、ロボットが必要とする幾多の動作を全て予め記録して蓄積し、これを活用するということは物理的に不可能である。

30

【0 0 0 4】

一方、モーションキャプチャー (motion capture) システムを利用することによってロボットに人間の動作を模倣して再現させる場合、キャプチャーされた人間の動作パターンをそのままロボットに適用するとロボットが人間のような自然な動作をすることもできる。しかし、質量、質量中心または慣性質量のような物性値が人間とロボットは互いに異なるためにキャプチャーされた動作がロボットに最適化されたということではない。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0 0 0 5】

このような問題を解決するために本発明は、ロボットが人間の動作を学習できる進化アルゴリズムに基づいたロボットの動作制御方法を提供する。

40

【課題を解決するための手段】

【0 0 0 6】

本発明の特徴によるロボットの動作制御方法は、(a) 人間の動作パターンを収集してデータベースを構築する段階; (b) 主成分分析及び逆動力学に基づいた補間法を適用した遺伝演算子を利用して前記データベースを進化させる段階; 及び (c) 前記進化したデータベースを利用してリアルタイムでロボットの動作を生成する段階を含むことができる。

【0 0 0 7】

50

前記 (a) 段階は人間の動作をモーションキャプチャーする段階を含むことができる。

【 0 0 0 8 】

また、前記 (b) 段階は、 (b - 1) ロボットが行う任意の動作と類似な動作状態を有する基本動作を前記データベースから 1 つ以上選択する段階；及び (b - 2) 主成分分析による主成分抽出及び前記主成分の結合を通じて最適動作を新たに生成することによって、前記選択された基本動作を再加工する段階を含むことができる。

【 0 0 0 9 】

前記 (b) 段階は、前記 (b - 1) 段階と前記 (b - 2) 段階を繰り返して行って前記データベースを進化させる段階を含むことができる。

【 0 0 1 0 】

10

前記 (b - 1) 段階で、前記任意の動作は次の式 (1 1) で示すことができる。

【 数 1 】

$$q(t) = q_{mean}(t) + \sum_{i=1}^4 x_i q_{pc_i}(t) + x_5 \quad (11)$$

ここで、

【 数 2 】

$$q(t)$$

20

は前記任意の動作の関節角軌跡、

【 数 3 】

$$q_{mean}(t)$$

は前記選択された基本動作の平均関節角軌跡、

【 数 4 】

$$q_{pc_i}(t)$$

30

は前記選択された基本動作の関節角軌跡の中で i 番目主成分軌跡、

【 数 5 】

$$x_i (i=1,2,3,4,5)$$

はスカラー係数である。

【 0 0 1 1 】

40

前記任意の動作の動作状態は次の式 (1 2) で示す境界条件を満足することができる。

【 数 6 】

$$q(t_0) = q_0, \quad q(t_f) = q_f, \quad \dot{q}(t_0) = \dot{q}_0, \quad \dot{q}(t_f) = \dot{q}_f \quad (12)$$

ここで、

【数 7】

$$q_0$$

は開始時間

【数 8】

$$t_0$$

における関節角、

10

【数 9】

$$\dot{q}_0$$

は開始時間

【数 10】

$$t_0$$

における関節角速度、

20

【数 11】

$$q_f$$

は終了時間

【数 12】

$$t_f$$

における関節角、

30

【数 13】

$$\dot{q}_f$$

は終了時間

【数 14】

$$t_f$$

における関節角速度である。

40

【0012】

前記（b-2）段階で、前記選択された基本動作が1つ以上の関節角軌跡を含む時、前記関節角軌跡の平均軌跡

【数 15】

$$(q_{mean})$$

を次の式（13）によって計算する。

【数 1 6】

$$q_{mean} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k q_i \quad (13)$$

ここで、k は選択された基本動作の数であり、

【数 1 7】

$$q_i \quad 10$$

は i 番目基本動作の関節角軌跡である。

【0 0 1 3】

また、次の式 (14) によって共分散行列 (S) を計算し、

【数 1 8】

$$S = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (q_i - q_{mean})(q_i - q_{mean})^T \quad (14) \quad 20$$

前記共分散行列から固有ベクターを得て、前記固有ベクターの中で前記関節角軌跡の主成分軌跡を得ることができる。

【0 0 1 4】

前記 (b - 2) 段階で、次の式 (15) を通じて前記選択された基本動作の関節トルク

【数 1 9】

$$(\tau)$$

を決める。

30

【数 2 0】

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + N(q, \dot{q}) = \tau \quad (15)$$

ここで、

【数 2 1】

$$q$$

40

は前記選択された基本動作の関節角、

【数 2 2】

$$\dot{q}$$

は前記選択された基本動作の関節角速度、

【数 2 3】

$$\ddot{q}$$

50

は前記選択された基本動作の関節角加速度、
【数 2 4】

$$M(q)$$

は質量マトリックス、
【数 2 5】

$$C(q, \dot{q})$$

10

はコリオリベクターである。
【0 0 1 5】

また、
【数 2 6】

$$N(q, \dot{q})$$

は重力及びその他の力を含む。
【0 0 1 6】

前記決められた関節トルクが次の式 (1 6) を最小にすると、前記選択された基本動作
を前記最適動作に決めることができる。 20

【数 2 7】

$$\frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \| \tau(q, \dot{q}, \ddot{q}) \|^2 dt$$

(1 6)

前記 (c) 段階は主成分分析及び機構学的補間による動作の再結合方法を利用すること
ができる。 30

【0 0 1 7】

また、前記 (c) 段階は、 (c - 1) ロボットが生成する動作と類似な動作状態を有する基本動作を前記進化したデータベースから 1 つ以上選択する段階; 及び (c - 2) 主成分分析による主成分抽出及び前記主成分の結合を通じて最適動作を新たに生成することによって、前記選択された基本動作を再加工する段階を含むことができる。

【0 0 1 8】

前記 (c - 1) 段階で、前記ロボットが生成する動作は次の式 (1 7) で示すことができる。

【数 2 8】

$$q(t) = q_{mean}(t) + \sum_{i=1}^3 x_i q_{pc_i}(t) + x_4$$

(1 7)

40

ここで、
【数 2 9】

$$q(t)$$

は前記ロボットが生成する動作の関節角軌跡、

50

【数 3 0】

$$q_{mean}(t)$$

は前記選択された基本動作の平均関節角軌跡、

【数 3 1】

$$q_{pc_i}(t)$$

は前記選択された基本動作の関節角軌跡の中で i 番目主成分軌跡、

10

【数 3 2】

$$x_i(i=1,2,3,4)$$

はスカラー係数である。

【0 0 1 9】

前記ロボットが生成する動作の動作状態は次の式 (18) で示す境界条件を満足することができる。

【数 3 3】

$$q(t_0) = q_0, \quad q(t_f) = q_f, \quad \dot{q}(t_0) = \dot{q}_0, \quad \dot{q}(t_f) = \dot{q}_f \quad (18)$$

20

ここで、

【数 3 4】

$$q_0$$

は開始時間

【数 3 5】

$$t_0$$

30

における関節角、

【数 3 6】

$$\dot{q}_0$$

は開始時間

【数 3 7】

$$t_0$$

40

における関節角速度、

【数 3 8】

$$q_f$$

は終了時間

【数 3 9】

$$t_f$$

における関節角、

【数 4 0】

$$\dot{q}_f$$

10

は終了時間

【数 4 1】

$$t_f$$

における関節角速度である。

【0 0 2 0】

前記 (c - 2) 段階で、前記選択された基本動作が 1 つ以上の関節角軌跡を含む時、前記関節角軌跡の平均軌跡

【数 4 2】

20

$$(q_{mean})$$

を次の式 (19) によって計算する。

【数 4 3】

$$q_{mean} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k q_i$$

(19)

30

ここで、k は選択された基本動作の数であり、

【数 4 4】

$$q_i$$

は i 番目基本動作の関節角軌跡である。

【0 0 2 1】

さらに次の式 (20) を通じて共分散行列 (S) を計算する。

【数 4 5】

40

$$S = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (q_i - q_{mean})(q_i - q_{mean})^T$$

(20)

次に、前記共分散行列から固有ベクターを得て、前記固有ベクターの中で前記関節角軌跡の主成分軌跡を得ることができる。

【0 0 2 2】

本発明によると、人間の基本動作をロボットの特性に合わせて進化させることによってロボットに最適化した動作を行うようにすることができる。

50

【 0 0 2 3 】

また、本発明によると、進化した基本動作データベースに基づいてロボットがリアルタイムで動作を生成することができる。

【 0 0 2 4 】

また、本発明によると、モーションキャプチャーデータのみあればこれを容易にロボットに適用することができるので、ロボットが人間の多様な動作を模倣及び再現することができる。

【 発明を実施するための最良の形態 】

【 0 0 2 5 】

以下、添付した図面を参照して本発明の実施例について本発明が属する技術分野における通常の知識を有する者が容易に実施できるように詳しく説明する。しかし、本発明は多用で相異なる形態で実現することができ、ここで説明する実施例に限られない。さらに、図面で本発明を明確に説明するために説明と関係ない部分は省略し、明細書全体にわたって類似の部分については類似の図面符号を付けた。

【 0 0 2 6 】

ロボットの動作は作業 (task) と状態 (condition) からなる。例えば、手をテーブル上のカップへ持っていく動作があるとする、手をカップに持っていくことがこの動作が属した作業であり、テーブル上のカップの位置がこの動作の状態である。しかし、すべての位置のカップに手を持っていく動作をいちいち蓄積しておいて、これを活用することは物理的に不可能である。

【 0 0 2 7 】

本発明の実施例では限定された数の動作のみを貯蔵し、1つ以上の関節角軌跡からなる動作を基本動作 (movement primitive) と定義する。また、本発明の実施例では基本動作の補間 (interpolation) を通じてカップの位置のような多様な動作状態に対するロボットの腕の動作を生成する。

【 0 0 2 8 】

1つの基本動作が進化アルゴリズムにおける1つの個体 (individual) となる。例えば、120 Hz でサンプリングされた120秒長さを有する基本動作があるとする、この個体の染色体形態 (genotype) は14400行を有する実数ベクターである ($14400 = 120 \text{ 秒} \times 120 \text{ Hz}$)。また、収集されて限定された数の基本動作が集団をなして両親個体として動作する。

【 0 0 2 9 】

図1は本発明の実施例による主成分分析基盤の遺伝演算子を示す図面である。

【 0 0 3 0 】

図1を参照すると、作業Tに属するn個の個体が両親個体をなしている。各個体を m_1 から m_n と表示すると、各個体はそれぞれ自分の動作状態を有する。つまり、個体 m_i の動作状態は c_i と表示される。

【 0 0 3 1 】

もし、動作状態 c_3 を有する動作が必要であれば、n個の両親個体の中で動作状態 c_3 と最も近い動作状態を有する個体をk個選択する。これは動作状態の類似性を比較する適切な尺度 (distance metric) を導入して解決することができる。

【 0 0 3 2 】

例えば、カップが特定の位置に置かれている場合、この特定の位置へ手を持っていく腕の動作が必要である。この場合、カップの3次元位置ベクターを動作状態 c_3 に定義することができ、動作状態の類似性を比較するために、次の式 (21) の形態で距離尺度を使用する。

【数 4 6】

$$d(c_i, c_3) = \|c_i - c_3\| \quad (21)$$

このように選ばれた k 個の動作個体を

【数 4 7】

$$p_1, p_2, \dots, p_k$$

10

と表示する。1つの動作個体はいくつかの関節角からなる。例えば、7自由度を有するマニピュレータの動作を記述すると動作個体1つは7個の関節角軌跡で構成される。

【0 0 3 3】

k 個の動作個体

【数 4 8】

$$p_1, p_2, \dots, p_k$$

から得られた最初（又は初期）自由度の関節角軌跡をそれぞれ

【数 4 9】

20

$$q_1, q_2, \dots, q_k$$

と表示する。この場合、次の式（22）を通じて平均軌跡 q_{mean} を得ることができる。

【数 5 0】

$$q_{mean} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k q_i \quad (22) \quad 30$$

一方、次の式（23）を通じて共分散行列 S が得られる。

【数 5 1】

$$S = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (q_i - q_{mean})(q_i - q_{mean})^T \quad (23)$$

共分散行列 S から得られた固有ベクターと固有値をそれぞれ

40

【数 5 2】

$$e_1, e_2, \dots, e_k$$

と

【数 5 3】

$$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$$

50

と表示する。ここで、固有値は
【数 5 4】

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_k \geq 0.$$

と整列された。

【0 0 3 4】

固有ベクター

【数 5 5】

$$e_1, e_2, \dots, e_k$$

10

を主成分とし、これら固有ベクターはそれぞれ関節角軌跡を示す。主成分分析の特性に応じて k 個の主成分の中で支配的ないくつかの主成分のみを有して全関節角軌跡の特性を知ることができる。それは主成分分析は高次元のデータを低次元の空間に投影させて次元を減らす機能をするためである。

【0 0 3 5】

結果的に、最初（初期）自由度の関節角

【数 5 6】

$$q_1, q_2, \dots, q_k.$$

20

から平均軌跡 q_{mean} と k 個の主成分軌跡

【数 5 7】

$$q_{pc_1}, q_{pc_2}, \dots, q_{pc_k}.$$

を得ることができる。一方、このような過程を第 2、第 3 などの関節に対する軌跡に対しても同一に適用し、各関節に対して平均軌跡と主成分軌跡を得ることができる。

30

【0 0 3 6】

一方、任意のロボット動作は下記式（2 4）のように平均軌跡と主成分軌跡の線状結合で示すことができる。

【数 5 8】

$$q(t) = q_{mean}(t) + \sum_{i=1}^4 x_i q_{pc_i}(t) + x_5$$

（2 4）

40

ここで $q(t)$ は関節角軌跡、 $q_{mean}(t)$ は平均関節角軌跡、

【数 5 9】

$$q_{pc_i}(t)$$

は i 番目主成分軌跡である。そして x_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$) はスカラー係数である。

【0 0 3 7】

一般に動作状態 c_3 は開始時刻 t_0 での関節角 q_0 と関節角速度

50

【数 6 0】

$$\dot{q}_0$$

、そして終了時刻 t_f での関節角 q_f と関節角速度

【数 6 1】

$$\dot{q}_f$$

で与えられる。

10

【0 0 3 8】

一方、未知数 x_i は 5 個であるので、4 個の境界条件を満足する未知数 5 個を決めるために次の式 (25)、(26) を通じて最適化過程を行う。

【数 6 2】

$$\frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \|\tau(q, \dot{q}, \ddot{q})\|^2 dt \quad (25)$$

20

【数 6 3】

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + N(q, \dot{q}) = \tau \quad (26)$$

ここで、

【数 6 4】

$$\tau$$

は関節トルクである。この関節トルクは関節角 q 、関節角速度

30

【数 6 5】

$$\dot{q}$$

及び関節角加速度

【数 6 6】

$$\ddot{q}$$

が決められると前記式 (26) を通じて計算することができる。最小化しようとする目的関数である式 (25) は与えられた関節軌跡を動かす時、ロボットが必要とするトルクの合計である。

40

【0 0 3 9】

このような最適化過程を通じて最小のエネルギー (トルク) を必要としながら、与えられた動作状態 c_3 を満足する動作個体、つまり、新たな m_3 を生成することができる。この過程を '逆動力学基盤の最適化を通じた動作の再結合 (Reconstituting motion via dynamics-based optimization)' と言う。

【0 0 4 0】

新たに生成された子供個体 m_3 は両親個体 m_3 のような動作状態 c_3 を持っている。しかし、子供個体 m_3 は両親個体 m_3 を含む複数固体の主成分を分解及び再結合して生成さ

50

れたものである。両親個体のような動作軌跡を有しない。したがって、進化アルゴリズム内で2つの個体の優秀性を判断してさらに優れた個体が次代の両親集団に属する。このような過程が c_0 から c_n まで適用されることによって n 個の子供集団が生成される。

【0041】

一方、両親集団に属する m_i と子供集団に属する m_i の中でさらに優れた動作個体を次代の両親集団に選定するために適合度関数 (fitness function) が必要であるが、これは次の式 (27) で定義される。

【数67】

$$\frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \|\tau(q, \dot{q}, \ddot{q})\|^2 dt$$

(27)

10

つまり、2つの動作個体の中でトルク (エネルギー) を少なく消費するものが次代の両親個体となる。

【0042】

式 (27) は式 (25) と同一である。つまり、遺伝演算子で使用された逆動力学基盤の最適化での目的関数と進化アルゴリズムで使用された目的関数が同一である。その理由は、遺伝演算子は局所的な最適化作用 (local optimizer) をして進化アルゴリズムは全

20

【0043】

図2は本発明の実施例による遺伝演算子と適合度関数を利用して基本動作が進化する過程を概略的に示す図面である。

【0044】

まず、人間の動作を収集して1つの作業を行う反復動作で初期両親集団を選択する。これら反復動作は多様な動作条件を包括することに選定する。

30

【0045】

次に、初期両親集団から動作個体を抽出し、抽出された動作個体は主成分分析基盤の遺伝演算子を通じて子供集団を形成する。

【0046】

また、両親集団と子供集団の動作個体をそれぞれ比較してさらに優れた動作個体が次代の両親集団を形成し、劣等な動作個体は捨てる。この過程は遺伝演算子で使用された逆動力学基盤の最適化過程の計算量のために多くの時間がかかる。

【0047】

次に、このように形成された進化した基本動作を利用して、その時その時必要とする動作をロボットがリアルタイムで生成することができる。この過程もまた基本動作の主成分分析とその再結合からなる。つまり、ロボットが任意の動作状態 c_i を有する動作を生成しなければならないと、動作状態 c_i と類似の動作状態を有する動作を進化した基本動作データベースから抽出し、主成分分析を通じて平均軌跡と主成分軌跡を得る。ここまでの過程は主成分分析基盤の遺伝演算子と同一である。

40

【0048】

しかし、主成分分析基盤の遺伝演算子とは異なって、ここではロボットの動作を構成することにおいて次の式 (28) のように平均軌跡と3つの主成分軌跡のみを使用する。

【数 6 8】

$$q(t) = q_{mean}(t) + \sum_{i=1}^3 x_i q_{pc_i}(t) + x_4 \quad (28)$$

ここで $q(t)$ は関節角軌跡、 $q_{mean}(t)$ は平均関節角軌跡、

【数 6 9】

$$q_{pc_i}(t) \quad 10$$

は i 番目主成分軌跡である。そして、 x_i ($i=1, 2, 3, 4$) はスカラー係数である。

【0 0 4 9】

一般に動作状態 c_3 は開始時刻 t_0 での関節角 q_0 と関節角速度

【数 7 0】

$$\dot{q}_0 \quad 20$$

、そして終了時刻 t_f での関節角 q_f と関節角速度

【数 7 1】

$$\dot{q}_f \quad 30$$

の 4 つに与えられる。

【0 0 5 0】

しかし、主成分分析基盤の遺伝演算子とは異なって、ここでは未知数 x_i が 4 つであるために 4 つの境界条件を満足する未知数 4 つを決める過程は簡単な行列演算に過ぎないので、リアルタイムで動作を生成することができる。

【0 0 5 1】

一方、二過程は境界での関節角及び関節角速度のみを考慮して動作を生成するので、‘機構学的補間を通じた動作の再結合 (Reconstituting motion via kinematic interpolation)’ という。

【0 0 5 2】

本発明の実施例では基本動作に対する主成分分析と共に、逆動力学基盤の最適化を通じた動作の再結合方法と機構学的補間を通じた動作の再結合方法を使用する。

【0 0 5 3】

しかし、逆動力学基盤の最適化を通じた動作の再結合方法を使用する場合、ロボットの物理的特性に最適化した動作を生成することができるという長所がある反面、最適化に時間が長くかかるためにロボットがリアルタイムで動作を生成できない短所がある。

【0 0 5 4】

これに反し、機構学的補間を通じた動作の再結合方法は簡単な行列演算のみを経るためにリアルタイムで動作を生成することができるが、生成された動作はキャプチャーされた人間動作の数学的、そして機構学的補間に留まるので、ロボットに最適化されたことではない。

【0 0 5 5】

図 3 は従来の方法と本発明の実施例による方法を比較するための図面である。従来の方法 1 と方法 2 は人間のモーションキャプチャーデータに直接主成分分析と動作再結合方法を適用する。

【0 0 5 6】

これに反し、本発明の実施例による方法 3 は人間のモーションキャプチャーデータを進化させてロボットの物理的特性を反映させ、この進化した基本動作に基づいてリアルタイムでロボットが必要な動作を得る。

【 0 0 5 7 】

以下、本発明のロボット動作制御方法による実験例及び比較例を記述する。しかし、本発明は以下の実験例または比較例に限定されることではない。

【 0 0 5 8 】

(実験例)

図 4 A は本実験例で使用された人間型ロボット ‘ マル ’ の外観を示す図面であり、図 4 B は腰関節と右腕を含む 7 自由度のマニピュレータを概略的に示す図面である。

10

【 0 0 5 9 】

投げられたボールをロボットが腕で取るためには、球の位置を追跡し、ボールを取る位置を予想しなければならない。また、ロボットが予想位置に腕を動かし、指でボールを取ることもしなければならない。しかし、本実験例ではロボットが人間のような自然な動作を生成するようにすることが目的であるので、残り能力は既に与えられていると仮定した。

【 0 0 6 0 】

図 5 A は実験者が自分に投げられたボールを取る前の姿を示す図面であり、図 5 B 及び 5 C は実験者が自分の正面及び肩の上側に投げられたボールを取る姿をそれぞれ示す図面である。また、図 6 A 及び 6 B は実験者がボールを受けた 1 4 0 個の地点を表示する正面図及び側面図である。

20

【 0 0 6 1 】

実験者の頭とボディー近くの多様な地点にボールを投げ、全 1 4 0 個のボールを受ける実験者の動作をキャプチャーした。つまり、本実験例では 1 4 0 個の基本動作が初期両親世帯を構成した。

【 0 0 6 2 】

動作状態 c_i は次の式 (2 9) によって定義された。

【 数 7 2 】

$$c_i = (R_i, p_i) \quad (29)$$

30

ここで、 R_i は実験者がボールを受けた瞬間の手の平の回転行列 (rotation matrix) であり、 p_i はその瞬間の手の平の位置ベクトル (position vector) である。一方、この行列とベクトルは全て実験者の腰に位置した基準座標系から見た時の値である。

【 0 0 6 3 】

各動作状態の間の類似性を示す距離尺度として次の式 (3 0) が定義された。

【 数 7 3 】

$$d(c_i, c_j) = w_1 \| p_i - p_j \| + w_2 \| R_i^T R_j \| \quad (30)$$

40

ここで、 R_i と p_i は動作状態 c_i に属し、 R_j と p_j は動作状態 c_j に属する。また、 w_1 と w_2 はスカラー加重値であり、本実験例では 1 . 0 と 0 . 5 に定めた。

【 0 0 6 4 】

図 7 A と図 7 B は基本動作に対する主成分分析の例を示す。つまり、図 7 A は任意に選択した 1 0 個の基本動作の関節角軌跡を示す図面であり、図 7 B は 7 A に図示された基本動作から支配的な主成分 4 つを抽出してこれを示す図面である。

【 0 0 6 5 】

本実験例では与えられた動作状態に最も近い 2 0 個の基本動作を選択して主成分を抽出し、この主成分を新たな動作を生成するのに使用した。

50

【 0 0 6 6 】

図 8 A は進化過程でさらに優れた子供個体で代替される両親個体の個数を示すグラフである。また、図 8 B は各世帯での個体の適合度関数値の平均を示すグラフである。

【 0 0 6 7 】

図 8 A を参照すると、1 世代から 2 世代に進化する時は 1 4 0 個の両親個体の中で 3 8 個の個体がさらに優れた子供個体で代替された。一方、代替される両親個体の個数は進化が進められることによって次第に減少したが、これは動作個体の最適化が一定の値で収斂するということを示す。

【 0 0 6 8 】

図 8 B を参照すると、適合度関数値の平均が 1 世代では 5 6 0 に至り、進化が行われた 1 0 世代では 4 6 0 以下に減った。

【 0 0 6 9 】

一方、1 世代から 1 0 世代まで進化させるのにかった時間は 2 G B の R A M を有するペンティアム（登録商標）4 コンピュータでほぼ 9 時間程度であった（以下、同一なコンピュータで遂行）。

【 0 0 7 0 】

（比較例 1）

図 9 A 及び 9 B はそれぞれ従来方法 1 及び本発明の実施例による方法 3 によって生成された動作の様相を示す正面図である。また、図 9 C 及び 9 D はそれぞれ従来方法 1 及び本発明の実施例による方法 3 によって生成された動作の様相を示す側面図である。また、図 1 0 は従来方法 1 と本発明の実施例による方法 3 によって生成された動作の関節角をそれぞれ示す図面である。

【 0 0 7 1 】

2 つの動作とも基本的には人間のモーションキャプチャーデータを使用するために外観は人間の動作のように自然である。また、同一な動作条件を持って動作を生成したので、開始時点と終了時点での関節角及び関節角速度がそれぞれ同一である。

【 0 0 7 2 】

しかし、開始時点から終了時点へ行く軌跡は同一な様相を示さないが、その効果は下記表 1 に示されている。

【表 1】

	従来方法 1	本発明の方法 3
動作生成時間	0. 0 9 2 秒	0. 1 0 1 秒
適合度関数の値	3 7 0. 0	2 7 5. 8

【 0 0 7 3 】

表 1 を参照すると、動作生成時間は 2 つの方法でほぼ同一であり、リアルタイムに近い短時間がかかるだけであった。これは 2 つの方法が活用する基本動作データが人間動作であるか進化した動作であるかの差にあり、動作を生成するアルゴリズムは同一であるためである。

【 0 0 7 4 】

一方、適合度関数の値は方法 3 でさらに小さく示されるが、これは方法 3 によって生成された動作がより少ないトルクが所要される最適化した動作であり、エネルギー効率的であるという意味である。したがって、本発明の実施例による方法 3 で使用された進化した

基本動作データベースが最適の動作生成に寄与したことを確認することができた。

【 0 0 7 5 】

(比較例 2)

図 1 1 A 及び 1 1 B はそれぞれ従来方法 2 及び本発明の実施例による方法 3 によって生成された動作の様相を示す正面図である。また、図 1 1 C 及び 1 1 D はそれぞれ従来方法 2 及び本発明の実施例による方法 3 によって生成された動作の様相を示す側面図である。

【 0 0 7 6 】

また、図 1 2 は従来方法 2 と本発明の実施例による方法 3 によって生成された動作の関節角をそれぞれ示す図面である。

【 0 0 7 7 】

2 つの動作もやはり基本的には人間のモーションキャプチャーデータを使用するために外観では人間の動作のように自然である。また、同一な動作条件を持って動作を生成したので、開始時点と終了時点での関節角及び関節角速度がそれぞれ同一である。

【 0 0 7 8 】

一方、動作の生成時間と適合度関数の値には差があるが、これは次の表 2 に示されている。

【表 2 】

	従来方法 2	本発明の方法 3
動作生成時間	1 1 . 3 2 秒	0 . 1 2 7 秒
適合度関数の値	3 4 8 . 7	3 8 5 . 1

【 0 0 7 9 】

表 2 を参照すると、従来方法 2 による場合、動作生成に 1 1 . 3 2 秒がかかり、本発明の実施例による方法 3 による場合には 0 . 1 2 7 秒しかかからなかったことが判る。

【 0 0 8 0 】

従来方法 2 による場合、逆動力学基盤の最適化過程を経るために計算に長時間がかかった。これに反し、従来方法 2 による場合には適合度関数の値は 3 4 8 . 7 で、本発明の実施例による方法 3 による場合に比べて最適化した様相を示す。つまり、従来方法 2 によって生成されたロボット動作は最もエネルギー効率的で最適化し、人間の動作と類似しているが、動作生成に長い時間がかかるためにリアルタイム動作生成には不適であった。

【 0 0 8 1 】

これに反し、本発明の実施例による方法 3 によって生成されたロボット動作は従来方法 2 によって生成されたことよりは最適化されていないが、迅速に動作を生成するという側面からリアルタイム動作生成に適した。

【 0 0 8 2 】

(比較例 3)

動作条件 1 0 個を有して方法 1、2 及び 3 全てを使用してそれぞれ動作を生成した。表 3 は生成されたそれぞれの動作 1 0 個を平均して、その性能を比較した結果を表 3 に示す。

10

20

30

40

【表 3】

	従来方法 1	従来方法 2	本発明の方法 3
動作生成時間	0. 1 0 9 秒	1 3. 2 1 秒	0. 1 1 5 秒
適合度関数の値	4 9 8. 7	3 7 2. 6	4 2 8. 4

10

【0083】

表 3 を参照すると、従来方法 1 と本発明の実施例による方法 3 による場合、動作生成に非常に短い時間がかかるためにリアルタイム動作生成への適用が可能であった。

【0084】

一方、従来方法 2 による場合には適合度関数の値が最も小さいために最適化した動作が作られたが、動作生成に時間が長く所要されてリアルタイム動作生成に適用することは難しかった。

【0085】

要するに、本発明の実施例による方法 3 による場合、リアルタイムで動作を生成することができ、多くの時間が所要されて最適化させた動作と最適化側面でほぼ対等な性能を示した。

20

【0086】

以上、本発明の実施例について説明したが、本発明の権利範囲はこれに限定されず、特許請求の範囲と発明の詳細な説明及び添付した図面の範囲内で多様に変形して実施することが可能であり、これもまた本発明の範囲に属するのは当然のことである。

【図面の簡単な説明】

【0087】

【図 1】本発明の実施例による主成分分析基盤の遺伝演算子を示す図である。

30

【図 2】本発明の実施例による遺伝演算子と適合度関数を利用して基本動作が進化する過程を概略的に示す図である。

【図 3】従来の方法と本発明の実施例による方法を比較するための図である。

【図 4 A】本実験例で使用された人間型ロボット「マル」の外観を示す図である。

【図 4 B】腰関節と右腕を含む 7 自由度のマニピュレータを概略的に示す図である。

【図 5 A】実験者が自分に投げられたボールを取る前の姿を示す図である。

【図 5 B】実験者が自分の正面側に投げられたボールを取る姿を示す図である。

【図 5 C】実験者が自分の肩の上側で投げられたボールを取る姿を示す図である。

【図 6 A】実験者がボールを受けた 1 4 0 個の地点を表示する正面図である。

【図 6 B】実験者がボールを受けた 1 4 0 個の地点を表示する側面図である。

40

【図 7 A】任意に選択した 1 0 個の基本動作の関節角軌跡を示す図である。

【図 7 B】図 7 A に示された基本動作から支配的な主成分 4 つを抽出してこれを示した図である。

【図 8 A】進化過程でさらに優れた子供個体で代替される両親個体の個数を示すグラフである。

【図 8 B】各世帯における個体の適合度関数値の平均を示すグラフである。

【図 9 A】従来方法 1 によって生成された動作の様相を示す正面図である。

【図 9 B】本発明の実施例による方法 3 によって生成された動作の様相を示す正面図である。

【図 9 C】従来方法 1 によって生成された動作の様相を示す側面図である。

50

【図 9 D】本発明の実施例による方法 3 によって生成された動作の様相を示す側面図である。

【図 1 0】従来方法 1 と本発明の実施例による方法 3 によって生成された動作の関節角をそれぞれ示す図面である。

【図 1 1 A】従来方法 2 によって生成された動作の様相を示す正面図である。

【図 1 1 B】本発明の実施例による方法 3 によって生成された動作の様相を示す正面図である。

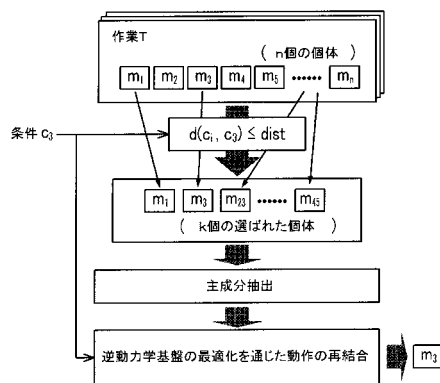
【図 1 1 C】従来方法 2 によって生成された動作の様相を示す側面図である。

【図 1 1 D】本発明の実施例による方法 3 によって生成された動作の様相を示す側面図である。

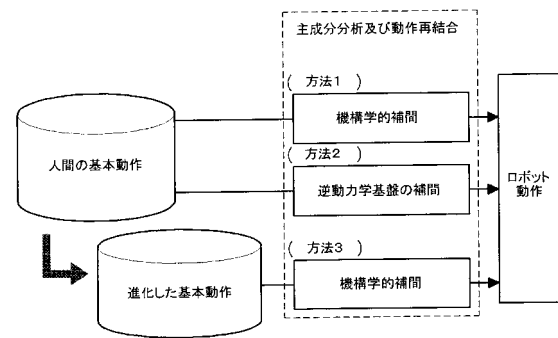
【図 1 2】従来方法 2 と本発明の実施例による方法 3 によって生成された動作の関節角をそれぞれ示す図面である。

10

【図 1】

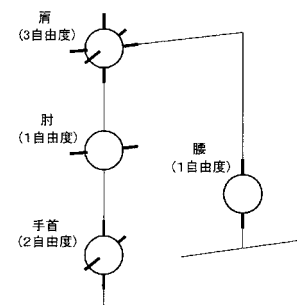
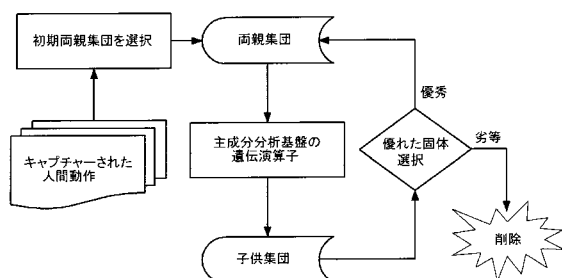


【図 3】

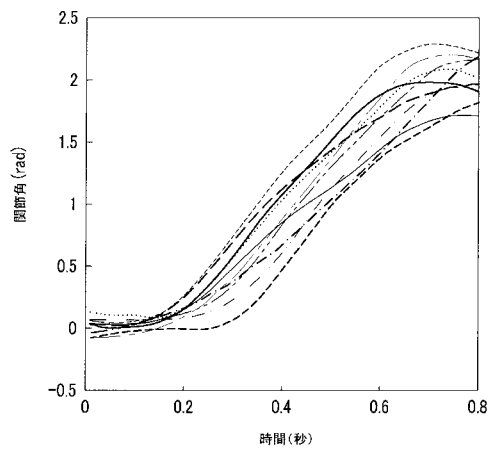


【図 4 B】

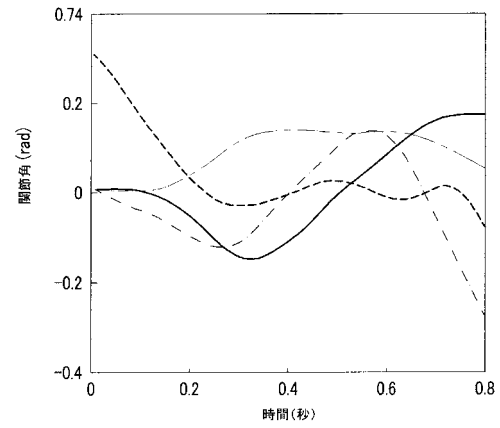
【図 2】



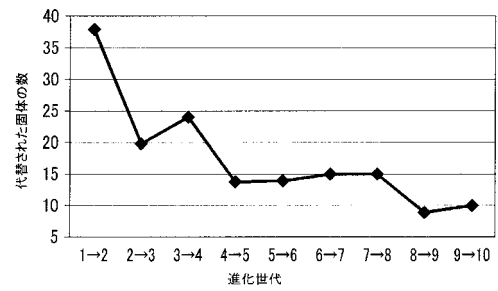
【図 7 A】



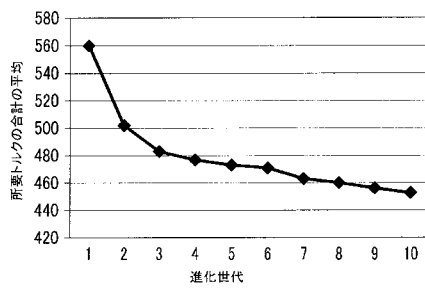
【図 7 B】



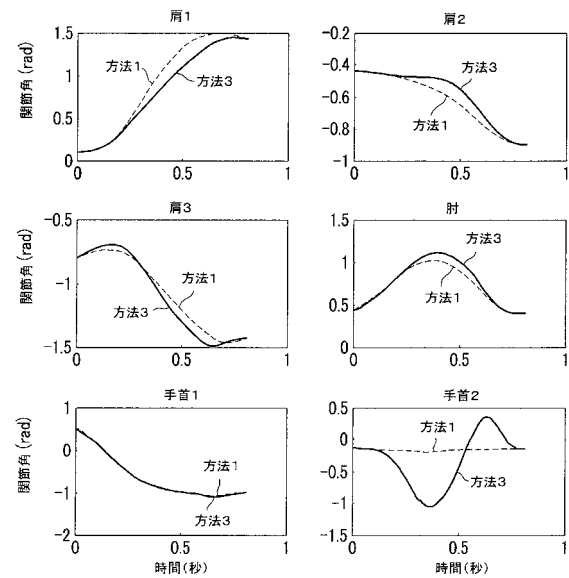
【図 8 A】



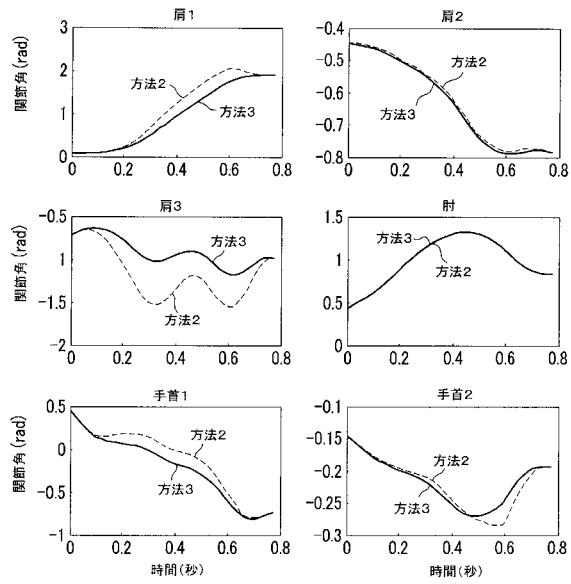
【図 8 B】



【図 10】



【図 12】



【 図 4 A 】



【図 5 A】



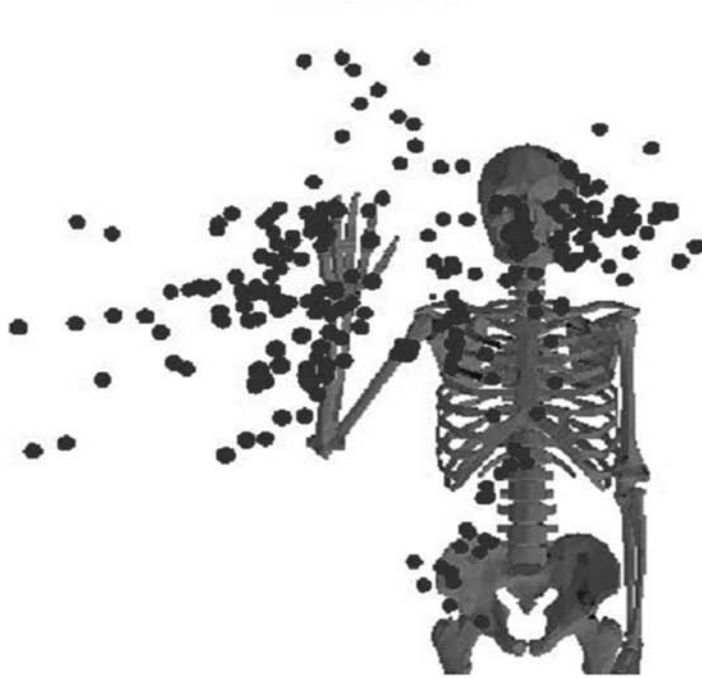
【図 5 B】



【図 5 C】



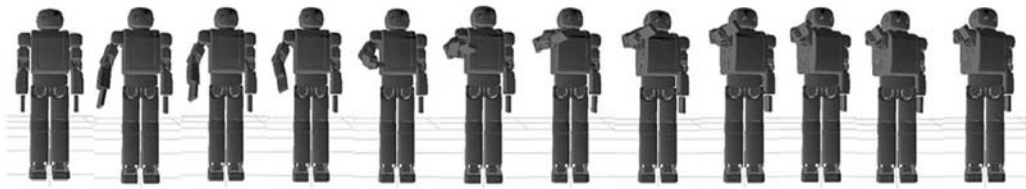
【図 6 A】



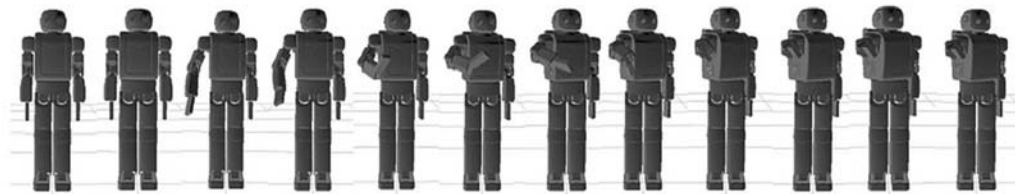
【図 6 B】



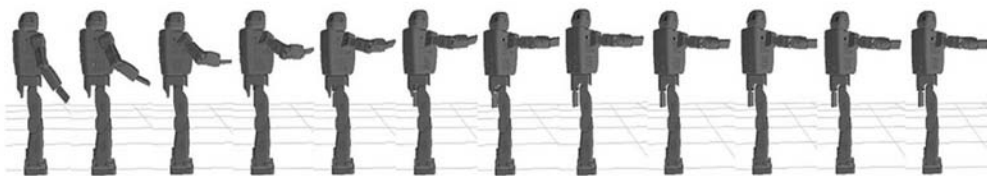
【図 9 A】



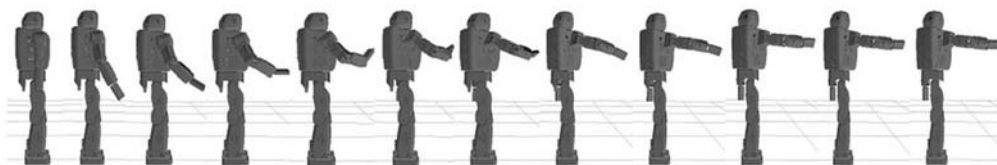
【図 9 B】



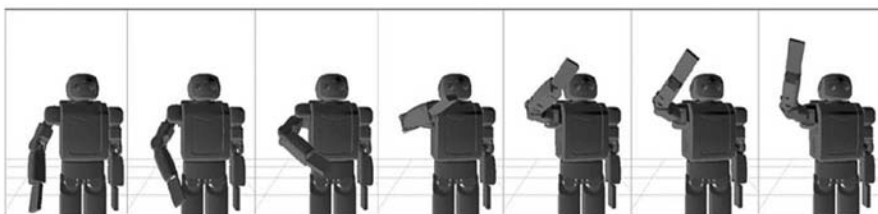
【図 9 C】



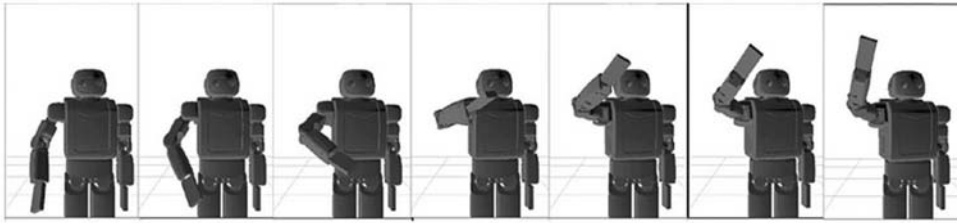
【図 9 D】



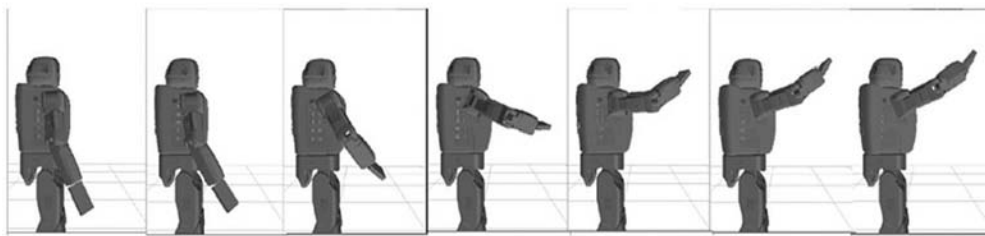
【図 1 1 A】



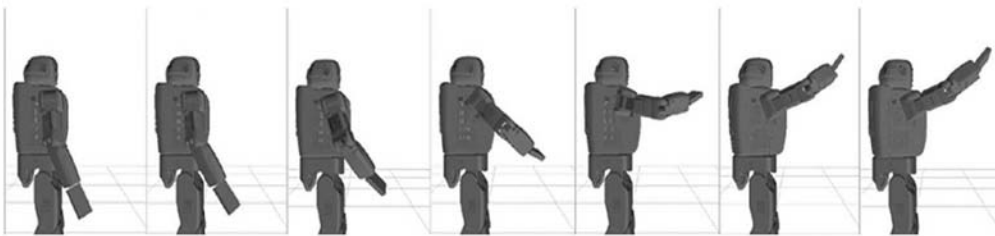
【図 1 1 B】



【図 1 1 C】



【図 1 1 D】



フロントページの続き

(74)代理人 100111235

弁理士 原 裕子

(72)発明者 羅 成 権

大韓民国ソウル市衿川区始興5洞 913-4番地

(72)発明者 バク、 ガ - ラム

大韓民国ソウル市瑞草区牛眠洞 ドンブグリーンビル 202号

(72)発明者 金 昌 煥

大韓民国ソウル市蘆原区上溪洞 1289番地 上溪ブルム大林アパート 210棟301号

(72)発明者 劉 凡 材

大韓民国ソウル市蘆原区中溪洞 366番地 ライフアパート 109棟1207号

Fターム(参考) 3C007 CS08 KS11 LW08 LW12 LW13 WA03 WA13 WB11 WB17