

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2004-520587  
(P2004-520587A)

(43) 公表日 平成16年7月8日(2004.7.8)

|                            |                    |             |
|----------------------------|--------------------|-------------|
| (51) Int. Cl. <sup>7</sup> | F I                | テーマコード (参考) |
| GO 1 N 29/10               | GO 1 N 29/10 5 O 1 | 2 GO 4 7    |
| GO 1 N 29/24               | GO 1 N 29/24 5 O 2 |             |

審査請求 有 予備審査請求 有 (全 39 頁)

|               |                              |          |   |
|---------------|------------------------------|----------|---|
| (21) 出願番号     | 特願2002-559659 (P2002-559659) | (71) 出願人 | 503267168<br>ガイドド アルトラソニックス (レイル)<br>) リミテッド<br>イギリス国、ノッティンガム、ドーバーベ<br>ック クロース ラベンシェッド、17 |
| (86) (22) 出願日 | 平成13年11月28日 (2001.11.28)     | (74) 代理人 | 100066692<br>弁理士 浅村 皓   |
| (85) 翻訳文提出日   | 平成15年7月25日 (2003.7.25)       | (74) 代理人 | 100072040<br>弁理士 浅村 肇   |
| (86) 国際出願番号   | PCT/GB2001/005262            | (74) 代理人 | 100072822<br>弁理士 森 徹  |
| (87) 国際公開番号   | W02002/059593                | (74) 代理人 | 100087217<br>弁理士 吉田 裕   |
| (87) 国際公開日    | 平成14年8月1日 (2002.8.1)         |          |   |
| (31) 優先権主張番号  | 0102118.7                    |          |   |
| (32) 優先日      | 平成13年1月26日 (2001.1.26)       |          |   |
| (33) 優先権主張国   | 英国 (GB)                      |          |   |

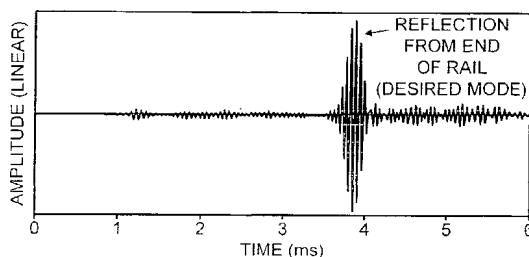
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 細長い非軸対称物体の検査

(57) 【要約】

細長い非軸対称物体を検査する装置で、前記細長い物体の外面に結合するよう動作可能な複数の波励振器を有する少なくとも1つの励振器アレイと、前記複数の波励振器を励振する駆動信号を生成するよう動作可能なドライバ・ユニットとを備え、被誘導音波モードが励起されるよう、前記アレイの個々の波励振器に向かう各駆動信号が、前記アレイにある他の波励振器への駆動信号に対して重み付けされ、さらに、被誘導音波モードが励起されるよう、前記アレイに複数の波励振器を有する受信ユニットと、反射した被誘導音波を受信できる複数の波受信器を有する受信ユニットと、受信した波を解析し、前記細長い非軸対称物体の状態を評価するよう動作可能な解析ユニットとを備える装置について説明する。

【選択図】 図9



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

細長い非軸対称物体を検査する装置で、  
前記細長い物体の外面に結合するよう動作可能な複数の波励振器を有する少なくとも1つの励振器アレイと、  
前記複数の波励振器を励振する駆動信号を生成するよう動作可能なドライバ・ユニットとを備え、被誘導音波モードが励起されるよう、前記アレイの個々の波励振器に向かう各駆動信号が、前記アレイにある他の波励振器への駆動信号に対して重み付けされ、さらに、反射した被誘導音波を受信できる複数の波受信器を有する受信ユニットと、  
受信した波を解析し、前記細長い非軸対称物体の状態を評価するよう動作可能な解析ユニットとを備える装置。 10

## 【請求項 2】

前記細長い物体に沿って相互に対して所定の距離に配置された少なくとも2つの励振器アレイを備え、前記波励振器アレイが、望ましくない被誘導波モードの伝播を抑制するため協働するよう動作可能である、請求項 1 に記載の装置。

## 【請求項 3】

前記励振器アレイの少なくとも1つがパルス・エコー・モードで動作可能であり、これにより前記波励振器が、1つの被誘導波モードを励起し、反射した波の所定モードを受信する波受信器としても働く、請求項 1 から 2 いずれか 1 項に記載の装置。

## 【請求項 4】

前記解析ユニットが、各波受信器からの受信信号の重み付け合計を実行して、前記特定の受信モードの振幅を示す信号を獲得するよう動作可能である、請求項 1 から 3 いずれか 1 項に記載の装置。 20

## 【請求項 5】

前記励振モードが、前記細長い物体の対称面に対して対称であり、前記特定の受信波モードが、前記励振モードのモード変換から生じた非対称モードである、請求項 4 に記載の装置。

## 【請求項 6】

受信した対称モード波も前記解析ユニットで解析する、請求項 5 に記載の装置。

## 【請求項 7】

各励振モードが前記細長い非軸対称物体の異なる領域を評価するよう、前記少なくとも1つの波励振器アレイが、複数の被誘導波モードを順次励振する、請求項 1 に記載の装置。 30

## 【請求項 8】

前記少なくとも1つの波励振器アレイが、前記細長い物体の対称面に対して対称である1つの被誘導音波モードを励振するよう動作可能であり、前記解析ユニットが、受信波において非対称モードと対称モードの少なくとも1つを検出することにより、前記細長い物体の欠陥を識別するよう動作可能である、請求項 1 に記載の装置。

## 【請求項 9】

前記解析ユニットが、反射波において1つの非対称モードを検出することにより、前記細長い物体の欠陥を識別するよう動作可能である、請求項 8 に記載の装置。 40

## 【請求項 10】

前記少なくとも1つの波励振器アレイが、締め付け機構によって前記細長い物体の前記外面に固定される、請求項 1 から 9 いずれか 1 項に記載の装置。

## 【請求項 11】

前記少なくとも1つの波励振器アレイが、結合機構によって前記細長い物体の前記外面に永久的に固定される、請求項 1 から 10 いずれか 1 項に記載の装置。

## 【請求項 12】

前記少なくとも1つの波励振器アレイが、運動中の列車に装着した複数の電磁超音波変換器のうち1つと前記細長い物体に固定された複数の電磁音響変換器とを備える、請求項 1 から 11 いずれか 1 項に記載の装置。 50

## 【請求項 13】

前記波励振器が、面に電圧が加わると、分極して変形する圧電要素を備える変換器である、請求項 1 から 12 いずれか 1 項に記載の装置。

## 【請求項 14】

前記細長い物体が鉄道レールである、請求項 1 から 13 いずれか 1 項に記載の装置。

## 【請求項 15】

前記複数の励振器が順次駆動される、請求項 1 から 14 いずれか 1 項に記載の装置。

## 【請求項 16】

前記解析ユニットが、合成開口処理を使用して受信波を解析する、請求項 15 に記載の装置。

10

## 【請求項 17】

前記波励振器が結合する前記外面が、前記細長い物体の横手方向断面を囲む、請求項 1 から 16 いずれか 1 項に記載の装置。

## 【請求項 18】

細長い非軸対称物質を検査する方法で、

前記細長い物体に結合された複数の波励振器をドライバ信号で駆動するステップを含み、被誘導音波モードが励起されるよう、個々の波励振器への各ドライバ信号を、他の波励振器への駆動信号に対して重み付けし、さらに、

反射した被誘導音波を受信するステップと、

前記細長い物体の状態を評価するため、前記受信波を解析するステップとを含む方法。

20

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

本発明は概ね、例えば鉄道軌道のレールなどの細長い非軸対称物体に、ひび、疲労、溶接部の弱点または他の構造的変形などの検査に関する。

## 【0002】

レールの状態の定期的検査は、鉄道網の安全性を保証するために絶対必要である。該当するレールは距離が長く、鉄道運営の中断を回避する必要があるため、レールの検査は実施が困難である。レール検査のために知られている技術には、超音波検査がある。変換器などの波励起要素をレールの特定区間に配置し、これを使用してバルク波を生成し、これは長手方向になるか、またはレールを通して移動するよう導波させることができる。このバルク波を使用して、変換器位置にすぐ隣接したレール部分を検査する。この技術は、一度に試験できるレールの長さは、非常に短く、試験プロセス中試験中のレール区間は、電車を通すことができないという欠点を有する。検査は、1つまたは複数の超音波変換器をカートまたは特殊な検査用電車に装着することにより、レールに沿ってこれをスライドして実施することができる。

30

## 【0003】

図1は、鉄道レールの断面を概略的に示す。レールは、湾曲した上隅20を有する頭部10。頭部から、頭部および自体を支持する広い爪先区間40へと下方向に延在する茎状ウェブ30を備える。レールは、爪先40の両側でクリップ50により枕木60に固定される。レールは、ウェブ30の中心を通過して対称の垂直面を有するが、非軸対称である。

40

## 【0004】

レールの幾何学的形状により、構造の全領域を検査することは困難であり、特に従来の超音波技術では、領域40を検査することが困難である。クリップ50が、この区域への変換器のアクセスを制限するからである。頭部領域の側部も、隅20の湾曲のために検査が困難である。つまり変換器は頭部のこの領域と面一になる可能性が低い。レールの隣接する区間を結合する「テルミット」溶接の検査は、標準的な超音波試験機器を使用すると困難である。これらの溶接部が、例えば1から5MHzなど、通常使用される超音波周波数で強く減衰する鑄造品だからである。

## 【0005】

国際特許出願第A96/12951号から、パイプの欠陥を試験するには、これらのパイ

50

ブに沿って伝播する被誘導音波を使用することが知られている。パイプの軸対称の性質により、軸対称励起を加えることによって特定の被誘導波モードを制御し、これによって発生する相互に密接に関連した多数の被誘導波モードという複雑な状況に対処することができる。この解決法が非軸対称系では働かない。

**【0006】**

本発明は、細長い非軸対称物体を検査する装置で、前記細長い物体の外面に結合するよう動作可能な複数の波励振器を有する少なくとも1つの励振器アレイと、前記複数の波励振器を励振する駆動信号を生成するよう動作可能なドライバ・ユニットとを備え、被誘導音波モードが励起されるよう、前記アレイの個々の波励振器に向かう各駆動信号が、前記アレイにある他の波励振器への駆動信号に対して重み付けされ、さらに、反射した被誘導音波を受信できる複数の波受信器を有する受信ユニットと、受信した波を解析し、前記細長い非軸対称物体の状態を評価するよう動作可能な解析ユニットとを備える装置を提供する。

10

**【0007】**

本発明は、細長い物体の表面に結合した複数の波励振器に対して重み付けした適切な駆動信号を使用することにより、細長い非軸対称物体に被誘導波検査を使用することができる技術を提供する。事前に実施した細長い物体の被誘導波モードの解析は、異なるモードについて、物体の表面の異なる点における相対変位に関する情報をもたらす。このように計算されたモード特定の変位に適合する適切な重み付けを採用することにより、選択した被誘導波モードを励振し、細長い物体の検査に使用することができる。

20

**【0008】**

望ましくない被誘導波モードの抑制を補助したり、逆方向への伝播を抑制したりすることによって性能を改善するため、本発明の好ましい実施形態は、複数のアレイ状の波励振器を使用して、励振されたモードを追加的に制御する。

**【0009】**

別個の励振器および受信器を設けてもよいことが理解される。しかし、励振器アレイをパルス・エコー・モードで操作し、それによって励振器が受信器としても働くと、効率および単純さの点で有利な利得が獲得される。

**【0010】**

反射信号を解析する能力は、各受信器からの信号を、特定の反射被誘導波モードに適した個々の重み付け係数で積算し、その反射被誘導波モードの信号強度を判断する技術を使用することにより改善される。

30

**【0011】**

細長い物体の欠陥または全体的状態に関する情報は、多様な被誘導波モードから取り出すことができるが、励振モードは細長い物体に対して対称のモードであり、特定の受信波モードは、所定の非対称モードまたは励振モードに対応するモードであることが好ましい。受信した対称モードと受信した非対称モードの両方を解析することが好ましい。

**【0012】**

細長い物体の非軸対称という性質は、軸対称パイプと比較すると困難さを招くが、特定の励振被誘導波モードが細長い非軸対称物体の特定区域に集中する可能性を与え、その特定区域に関する情報をさらに明白にすることもできる。一例として、異なる励振被誘導波モードを使用して、鉄道レールの頭部、ウェブおよび爪先に集中させることができる。

40

**【0013】**

励振器は、色々な方法で細長い物体に固定することができるが、好ましい実施形態では、締め付け機構で励振器アレイを細長い物体に固定する。このような締め付け機構は、一時的または永久的に細長い物体に固定することができる。さらなる好ましい実施形態では、変換器をレールに接着する。

**【0014】**

圧電変換器を使用して励振器を形成すると、特に都合がよい。

50

## 【0015】

本発明の技術を使用して、橋や建物の構造部材など、多様な細長い非軸対称物体を検査することができるが、本発明は、鉄道レールの試験に特に有効性を有する。

## 【0016】

複数の励振器を同時に駆動してもよいが、好ましい実施形態は異なる励振器を順次駆動する。この場合、合成開口処理技術（それぞれ合成送信および合成受信）を使用して、受信波を解析してもよい。

## 【0017】

別の態様から見ると、本発明は、細長い非軸対称物質を検査する方法で、前記細長い物体に結合された複数の波励振器をドライバ信号で駆動するステップを含み、被誘導音波モードが励起されるよう、個々の波励振器への各ドライバ信号を、他の波励振器への駆動信号に対して重み付けし、さらに、反射した被誘導音波を受信するステップと、前記細長い物体の状態を評価するため、前記受信波を解析するステップとを含む方法を提供する。

10

## 【0018】

次に、細長い非軸対称物体を検査する装置の実施形態について、添付図面に関して、例示によってのみ説明する。

## 【0019】

所与の周波数でレール中を伝播できる被誘導波モードは、Journal of Sound and Vibration、Vol. 185、pp 531 - 543のL. Gavricによる「Computation of propagative waves in free rail using a finite element technique」で説明されたものと同様の技術を使用して識別される。これは、有限要素法に基づくが、レールの断面しかモデル化されない。

20

## 【0020】

図2は、上述した技術を用いて獲得されたレールの位相速度分散曲線を示す。この分散曲線を使用して、所与の周波数でレール中を伝播する被誘導波モードを識別することができる。図2から、所与の周波数で存在する様々なモードは、通常、異なる伝播速度を有することが分かる。図3から図6は、約17kHzの周波数で伝播する被誘導波に対応するレールのモード形状の例である。このモード形状は代表的サンプルであり、指定された周波数で伝播するのはこのモード形状だけではない。図3から図6はそれぞれ、レールの2次元有限要素メッシュ・モデルを示す。x軸は垂直で、レールのウェブに平行に延び、y軸は水平で、爪先に平行に延び、x軸はレールの長さの方向に延びる。各ケースで、特定の伝播モードに対応する変形ウェブが、波が励起されていない非変形メッシュと一緒に描かれている。

30

## 【0021】

図3は、頭部の動作が優勢であるモードのレール変位を示す。図3Aは、y軸とz軸との間で直接見たメッシュの図を示す。z軸に沿った頭部の変位100は、このモードに特有である。ウェブの上部分も、頭部の同じ方向でz軸に沿って多少変位する。図3Bはy軸に沿った図で、垂直に対する変位を示す。ウェブの下部分は、頭部に対して反対方向で、垂直から少々変位している。図3Cはz軸に沿った図であり、これは中央および両端で上方向に変形するウェブの多少の変位があることを示す。図3Cは、頭部モードが、ウェブの中心を通過してx軸に平行に延びる対称軸に対して対称であることも示す。

40

## 【0022】

図4は、爪先の動作が優勢であるモードのレール変位を示す。図4Aは、y軸とz軸との間で見たメッシュの図を示す。爪先の変位は、このモードに特有である。y軸に沿った爪先の端部は両方とも、プラスのx方向に変位する。変位は、ほぼ完全に爪先領域に限定される。図4Bはx軸に沿った図であり、垂直に対する爪先の両端の変位を示す。爪先の対抗する端部は、z軸に沿って反対方向に変位し、したがって変位していない爪先に対応す

50

る長方形の細片が捻れる。図 4 C は z 軸に沿った図であり、これは、爪先の両端に向かって徐々に増加する上方向の x 変位を、さらに明瞭に示す。図 4 C は、この爪先モードが、ウェブの中心を通過して x 軸に平行に延びる対称軸に対して対称であることも示す。

【 0 0 2 3 】

図 5 は、ウェブの動作が優勢であるモードのレール変位を示す。図 5 A は、y 軸と z 軸のちょうど間で見えたメッシュの図を示す。z 軸に沿ったウェブの大きい変位は、このモードに特有である。爪先も、このモードで少々の変位を経験する。図 5 B は y 軸に沿った図であり、x 軸に対する端ウェブの大きい変位を示す。変位は、ウェブの中心で最大値を有し、ウェブの両端に向かって徐々に減少する。頭部は、ウェブの変位とは反対方向に少々変位する。図 5 C は z 軸に沿った図であり、これは、爪先の変位をさらに明瞭に示す。図 5 C は、このウェブモードが、ウェブの中心を通過して x 軸に平行に延びる対称軸に対して対称であることも示す。

10

【 0 0 2 4 】

図 6 は、ウェブの中心を通過して x 軸に平行に延びる対称軸に対して逆対称であるモードのレール変位を示す。図 6 A は、y 軸と z 軸との間で直接見たメッシュの図を示す。ウェブは、x - y 面で大きく湾曲して、頭部は z 方向に変位し、したがって y 軸に沿った頭部の両端は、z 軸に沿って反対方向に変位する。図 6 B は y 軸に沿った図であり、x 軸に沿ったウェブの捻れを示す。図 6 C は z 軸に沿った図であり、これは、頭部およびウェブの優勢な変位を、爪先の小さい変位とともに、さらに明瞭に示す。

【 0 0 2 5 】

励起できるモードは、レールの長さに沿ってウェブの中心を通り垂直に延びるレールの対称面に対して対称または逆対称である。図 3 のような対称の波が、これも対称面に対して対称である溶接部などの特異部分に入射すると、レール中で励起されるどのモードも、図 6 に示すモードのような逆対称モードにモード変換される可能性が低い。しかし、ひび割れなどのレール内の欠陥は、対称である可能性が非常に低く、したがって対称モードがひび割れで反射すると、通常は、少なくとも部分的に、対称の出射波と同じ周波数を有する逆対称モードにモード変換される。この場合、反射した信号は、対称モードと逆対称モードとの両方を含む。反射波の特性を解析すると、典型的にほぼ対称で、したがってモード変換を誘発しない良好な溶接部からのモード変換を誘発する構造的欠陥の存在を区別する方法を提供する。この実施形態では、波励振器アレイによって対称モードのみが励起される。あるいは、非対称特異部で対称モードにモード変換するだけの逆対称モードのみを励起することができる。励起モードが対称か逆対称かに関係なく、受信器は、反射された波の対称モードと非対称モードとの両方を検出できなければならない。励起されたモードを反射する欠陥が対称である場合は、励起波のモード・タイプのみが通常は受信される。したがって、逆対称のモード変換波が存在しない場合、それは反射体が対称である可能性が高いことを示す。

20

【 0 0 2 6 】

図 7 は、レールの表面の 14 ヶ所に展開した本発明の第 1 実施形態による変換器アレイを有するレール 70 の断面図を示す。この実施形態では、合計 14 個の変換器をレールの一断面の周囲に配置し、したがって 6 個がレールの頭部に、4 個がウェブに、4 個が爪先に配置される。必要な変換器の数は、抑制すべき望ましくないモードの数、および励起すべきモード形状の複雑さとともに増加する。変換器はレールに接合することができるが、代替締め付け構成について後述する。

30

40

【 0 0 2 7 】

代替実施形態では、変換器をレールの長さに沿った線形アレイ状に配置する。

【 0 0 2 8 】

各変換器は、面に電圧を加えると分極して変形する圧電要素（電磁超音波変換器（EMAT））を使用してもよく、変換器をレールに締め付けるのではなく、移動中の列車に装着する実施形態では、これが好ましい）から形成される。したがって、各変換器が波励振器として作用することができる。各変換器に加える電圧を、レール表面の対応する点において

50

必要な変形量に応じて、別個に調節することができる。各変換器は、レールに沿った波の電波による変形を電気信号に変換することにより、波受信器としても作用することができる。変換器アレイには、各変換器に異なる駆動電圧を供給することができる駆動機構を設ける。駆動機構は、多チャンネル信号発生器、および各出力チャンネルを別個に調節することができるパワー増幅器で構成される。パワー増幅器からの出力を使用して、波励振器として働く高インピーダンス圧電変換器に励起信号を供給する。励起の全体的パターンが所望のモード形状に対応するよう、アレイにある各変換器への入力電圧を、アレイの他の変換器に対して重み付けする。特定のモードの励起に必要な重み付けは、前述した G a v r i c の方法と同様の方法を用いて計算する。

**【0029】**

E M A T は、溶接部の欠陥を検出するために計画的箇所ではレールに永久的に取り付けてもよい。

**【0030】**

変換器アレイを使用して、幾つかのモードを順次起動することができる。これを使用して、所与のモードによって優先的に変位するレールの特定部分に発生する欠陥を特定して狙うことができる。例えば、図3に示すモードは大部分が頭部に限定され、図4に示すモードは大部分が爪先に限定されて、図5に示すモードは大部分がウェブに限定され、したがってこれらのモードを使用して、レールの頭部、爪先およびウェブの欠陥を個々に識別することができる。

**【0031】**

図8は、1つの波励振器によって誘導され、1つの波受信器によって検出される被誘導波信号に対応する振幅と時間のミリ秒単位の線形プロットである。信号は、望ましくない励起モードに対応する2つの大きい振幅振動、およびレール端部からの反射に対応する、これより小さい振幅の信号を備える。小さい方の振幅信号は所望のモードに対応する。

**【0032】**

図9は、重み付けした駆動信号にて変換器アレイを使用して誘導し、パルス・エコー・モードの動作および合成開口技術を使用して検出した被誘導波信号に対応する振幅と時間のミリ秒単位の線形プロットである。送信と受信に同じ重み付けを使用した。この場合、レール端部から反射した所望のモードの振幅は、望ましくないモードによる外乱よりはるかに大きい。

**【0033】**

1つの変換器ではなく変換器アレイを使用することの利点が、所望のモードより振幅が大きいスプリアス・モードを特徴とする図8の信号を、スプリアス・モードが所望のモードの振幅と比較して小さい振幅を有する図9の信号と比較することによって実証されている。変換器アレイを使用すると、欠陥および溶接部などの特徴が識別しやすくなる。

**【0034】**

図10は、本発明の実施形態による変換器アレイを示す。この場合は、締め付け機構を使用して、変換器をレールの区間にしっかり取り付ける。この実施形態の締め付け機構は、その長さに沿って半分近くで相互に旋回自在に取り付けた2本のアームを備える。旋回軸を越えると、アームは交差し、ねじおよび回転可能な柄を備えるねじ機構に取り付けられる。クランプは開位置および閉位置を有する。クランプは、旋回したアームが相互に引っ張られるようねじ機構の柄を回転することにより係合させる。クランプは、変換器が動作可能な状態で図示の位置にてレール表面に係合するよう閉じる。多くの代替締め付け機構が可能であり、変換器をレールに永久的に取り付けることも可能である。

**【0035】**

列車がまだレール上を走行している間に試験システムを配置する場合、レール頭部の上面に変換器を配置することは可能でない。この場合、変換器アレイへの入力の重み付けによるモード制御がさらに困難になるが、レール頭部の上面に力を加える変換器を使用せずに、望ましくないモードを抑制することは、なお可能である。波励振器アレイは、レール表面全体に分散する点に力を加える必要がない。

10

20

30

40

50

## 【0036】

各独立の駆動周波数を有する1本の変換器アレイを使用して獲得可能なモード制御は、(図11に示すように)レールの長さに沿って所定の距離だけ隔置された2つ以上の波励振器アレイを使用することによって改善することができる。望ましくない励起の抑制と、所望の対称モードの振幅増加との両方に、複数の励振器アレイを使用することができる。複数のアレイを使用して、レールに沿った一方向に特定の被誘導音波を励起することができる。変換器を動作可能な状態でレール頭部の上面に係合させることができない場合は、複数のアレイを使用することが、特に適切である。

## 【0037】

所与の周波数で伝播する代替モードの波長は、通常は異なるので、特定のモードを強化し、他のモードは抑制するよう、少なくとも2つの励振器アレイを介してレールに力を加えることが可能である。例えば、望ましいモードの波長が  $\lambda$  で、望ましくないモードの波長が  $2\lambda$  であるとする。2つの励振器アレイをレールの長さに沿って距離  $\lambda$  だけ離して配置し、両方のアレイに同一の励振信号を加えると、励起が、望ましいモードの同位相の点で効果的に与えられ、しかして望ましくないモードの反対位相の点で効果的に加えられる。望ましいモードは強調され、望ましくないモードは低下される。望ましいモードと望ましくないモードの波長が、単に相互の倍数ではない状況では、望ましいモードの強化および望ましくないモードの抑制は、個々の励振器アレイで励起信号の位相を適切に調節することによって達成することができる。レール中を伝播する被誘導波モードの選択性は、励振器アレイをモード選択および伝播方向選択に必要な最小数より多く使用することにより、改善することができる。

## 【0038】

波励振器アレイは、各アレイが励振器と反射波の受信器との両方として作用するよう、パルス・エコー・モードで動作することができる。アレイの変換器は、受信器として作用する場合、各変換器が検出したレール表面の機械的変位を電気信号に変換する。各変換器で検出した変位から生じる電気信号は、所定セットの重み付けに従って別個に増幅することができる。増幅重み付けのセットを適切に調節し、結果の電気信号を合計することにより、該当する伝播モードの振幅に比例する信号を獲得することができる。受信器の重み付けを調節して、送信および反射モードに、または逆対称モード変換済み反射に比例する信号を獲得することができる代替実施形態では、各変換器で検出された変位を、同じ量で増幅し、結果の信号を重み付けした合計を、コンピュータ・ソフトウェアで実行する。この試験は、各送信モードと受信モードの組合せにつき繰返される。逆対称反射波の存在を検出する第1試験、および最初に送信されたモードの反射を検出する第2試験は、通常、溶接部または欠陥などのレールの特異部の幾何学的形状を示すために実行する。上述した変換器変位の重み付け合計を実行することによって獲得可能な純粋な被誘導波モードの受信は、欠陥検出技術の有効性にとって、純粋被誘導波モードの選択的励起と同様に重要である。

## 【0039】

本発明のさらなる実施形態によると、多くの送信モードと受信モードの組合せを同時に解析することができる。この場合、励振器アレイの各変換器を使用して、レールを励振させ、受信アレイの各要素で結果の反射を受信する。つまり送信は1つの変換器を使用し、受信はアレイの全変換器を使用する。別個の送信変換器と受信変換器を使用する場合、送信は送信器アレイの1つの要素で、受信は受信器アレイの全要素で実行される。パルス・エコーを同じ変換器で使用する場合、受信は、送信器を含む全エレメントで実行される(パルス・エコーなしに1つのアレイを使用して妥当な(ただし多少低下した)性能を獲得することも可能であり、この場合は、送信を1つの要素で、受信をその他全部の要素で実行する)。最初に言及した技術は、超音波でしばしば使用される合成開口技術と類似している。合成開口は、様々な信号を測定し、次々に記録して、その後組み合わせたプロセスである。合成開口集束は、通常、1つの伝播モードを考慮し、組み合わせた測定値を使用して、空間の特定領域を検査する。本発明の場合は、時間の関数としての変位振幅を、送

10

20

30

40

50



信および受信変換器の異なる位置で測定し、ソフトウェアの追加プロセスを使用して、特定の送信モードと受信モードの対の挙動を分離する。この実施形態の利点は、1つの試験で複数の対を解析できることである。このプロセスは、所与の試験について大量のデータを処理する必要があることがあるが、要素の組合せを順次個別に駆動するのではなく、同時に駆動することにより、必要な励振数を減少させることが可能である。例えば、送信モードが対称である送信モードと受信モードの組合せしか検査する必要がないことが判っている場合は、対称面に対して対称に配置した励振器アレイの2つの変換器に、励振を同時に加えることができる。合成開口構成では、通常、2セットの処理が必要である。つまり、対称励振モードに対応する受信モードを検出する第1セット、および励振された波をモード変換した非対称モードに対応する受信モードを検出する第2セットである。

10

【図面の簡単な説明】

【図1】

レールの横手方向断面略図である。

【図2】

レールの分散曲線を示す。

【図3】

レールの頭部区間の動作が優勢である伝播被誘導波の対称モードを示す。

【図4】

レールの爪先区間の動作が優勢である伝播被誘導波の対称モードを示す。

【図5】

レールのウェブ区間の動作が優勢である伝播被誘導波の対称モードを示す。

20

【図6】

レールの頭部区間およびウェブ区間両方の動作が優勢である伝播被誘導波も軸対称モードを示す。

【図7】

本発明の第1の実施形態による典型的な変換器アレイを概略的に示す。

【図8】

1つの波励振器を使用してレールに被誘導波を励起した結果として検出される伝播モードの実験結果を示す振幅対時間の線形プロットである。

【図9】

独立した各駆動電圧を有する複数の波励振器を使用してレールの被誘導波を励起した結果として検出される伝播モードの実験結果を示す振幅対時間の線形プロットである。

30

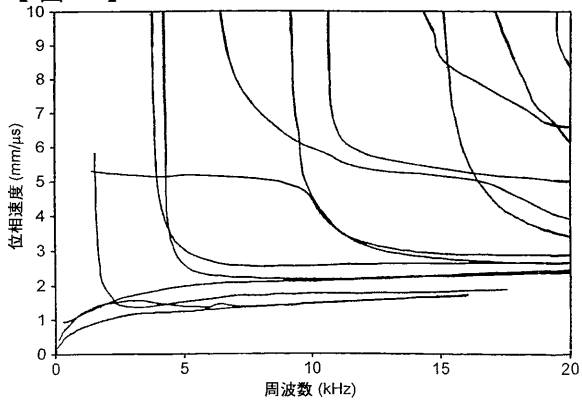
【図10】

アレイ状の波励振器を動作可能な状態でレールに取り付けるために使用する、本発明の第2の実施形態による締め付け機構を示す。

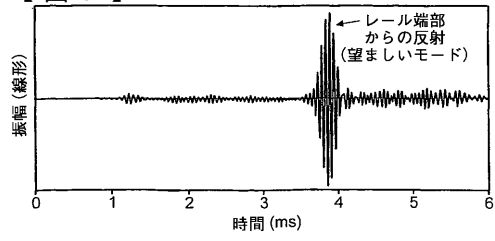
【図11】

レールに沿って隔置された複数の変換器アレイを概略的に示す。

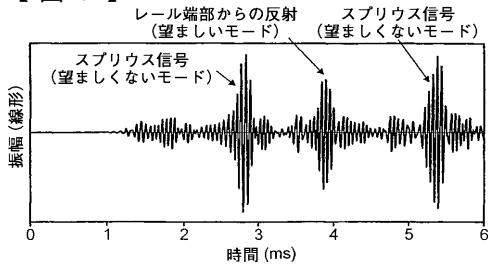
【 図 2 】



【 図 9 】



【 図 8 】



【国際公開パンフレット】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization  
International Bureau



(43) International Publication Date  
1 August 2002 (01.08.2002)

PCT

(10) International Publication Number  
WO 02/059593 A2

(51) International Patent Classification: G01N 29/00

(74) Agents: ROBINSON, Nigel, Alexander, Julian et al.; D Young & Co, 21 New Fetter Lane, London EC4A 1DA (GB).

(21) International Application Number: PCT/GB01/05262

(81) Designated States (national): AE, AG, AI, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GI, GM, GR, GU, HK, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(22) International Filing Date:  
28 November 2001 (28.11.2001)

(25) Filing Language: English

(26) Publication Language: English

(30) Priority Data:  
0102118.7 26 January 2001 (26.01.2001) GB

(84) Designated States (regional): ARIPO patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SI, TR), OAPI patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

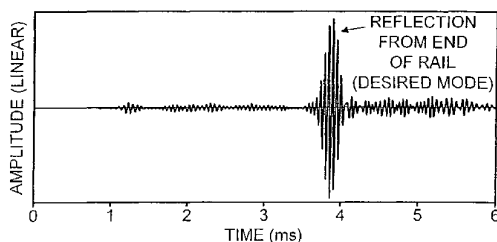
(71) Applicant (for all designated States except US): GUIDED ULTRASONICS (RAIL) LTD [GB/GB]; Ravenshead, 17 Doverbeck Close, Nottingham NG15 9LR (GB).

(72) Inventor; and  
(75) Inventor/Applicant (for US only): ALLEYNE, David, Nathaniel [GB/GB]; 565 Rayners Lane, Middlesex HA5 5HP (GB).

Published:  
without international search report and to be republished upon receipt of that report

[Continued on next page]

(54) Title: INSPECTION OF NON AXI-SYMMETRIC ELONGATE BODIES



(57) Abstract: There is described apparatus for inspecting a non axi-symmetric elongate body comprising: at least one exciter array having a plurality of wave exciters operable to couple to an exterior surface of said elongate body; a driver unit operable to generate driving signals to excite said plurality of wave exciters wherein each driving signal to a respective wave exciter of said array is weighted with respect to driving signals to other wave exciters in said array such that a guided acoustic wave mode is excited; a receiving unit having a plurality of wave receivers in said array such that a guided acoustic wave mode is excited; a receiving unit having a plurality of wave receivers capable of receiving reflected guided acoustic waves; an analysis unit operable to analyse received waves to assess a condition of said non axi-symmetric elongate body.

WO 02/059593 A2

**WO 02/059593 A2**



---

*For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.*

WO 02/059593

PCT/GB01/05262

**Inspection of Non Axi-Symmetric Elongate Bodies**

The present invention relates generally to the inspection of non axi-symmetric elongate bodies, such as, for example, the rails of a railway track for cracks, fatigue, weaknesses in welds or any other structural deformation.

5

Regular inspection of the condition of rails is imperative to ensure the safety of a rail network. The large distances of rail involved and the need to avoid interruptions to train services make inspection of rails difficult to implement. Known techniques for the inspection of rails include ultrasonic inspection. A wave exciting element such as a transducer is placed on a specific section of rail and is used to induce bulk waves that can be longitudinal or shear to travel through the rail. These bulk waves are used to inspect the portion of rail immediately adjacent to the transducer location. This technique has the disadvantage that only small lengths of rail can be tested at a time and the section of rail being tested is out of use by trains during the test process. The inspection may be carried out by sliding one or more ultrasonic transducers along the rail by mounting them on a cart or on a special inspection train.

Figure 1 illustrates schematically a cross-section of a railway rail. The rail comprises a head 10 with curved upper corners 20; a stem-like web 30 extending from the head down to a broad toe section 40 that supports the head and web. The rail is secured onto a sleeper 60 by a clip 50 on either side of the toe 40. The rail has a vertical plane of symmetry through the centre of the web 30, but is non axi-symmetric.

The geometry of the rail makes it difficult to inspect all regions of the structure and, in particular, conventional ultrasonic techniques make it difficult to inspect the toe region 40 because the clips 50 restrict the access of transducers in this area. The sides of the head region are also difficult to inspect due to the curvature of the corners 20 which means that the transducers will be unlikely to sit flush on this region of the head. Inspection of the "thermit" welds that join adjacent sections of rail is difficult

30

WO 02/059593

PCT/GB01/05262

2

using the standard ultrasonic test equipment because these welds are castings which attenuate strongly at the ultrasound frequencies typically used, such as 1 to 5 MHz.

It is known from International Patent Application WO-A-96/12951 to use  
5 guided acoustic waves that propagate along pipes to test those pipes for defects. The  
axi-symmetric nature of the pipes allow control over the particular guided wave modes  
excited by applying axi-symmetric excitation, thereby dealing with the complication of  
the large number of closely related possible guided wave modes. This solution does  
not work in non axi-symmetric systems.

10

The invention provides an apparatus for inspecting a non axi-symmetric  
elongate body comprising:

at least one exciter array having a plurality of wave exciters operable to couple  
to an exterior surface of said elongate body;

15

a driver unit operable to generate driving signals to excite said plurality of  
wave exciters wherein each driving signal to a respective wave exciter of said array is  
weighted with respect to driving signals to other wave exciters in said array such that a  
guided acoustic wave mode is excited;

20

a receiving unit having a plurality of wave receivers capable of receiving  
reflected guided acoustic waves; and

an analysis unit operable to analyse received waves to assess a condition of  
said non axi-symmetric elongate body.

25

The invention provides a technique whereby guided wave inspection may be  
employed for non axi-symmetric elongate bodies by using appropriate weighted  
driving signals to a plurality of wave exciters coupled to the surface of the elongate  
body. Analysis of the guided wave modes of the elongate body performed in advance  
yields information regarding the relative displacements at different points on the  
surface of the body for different modes. By adopting appropriate weightings matched  
30 to these calculated mode specific displacements, a selected guided wave mode can be  
excited and used to inspect the elongate body.

WO 02/059593

PCT/GB01/05262

3

In order to improve performance by helping suppress unwanted guided wave modes and/or suppressing propagation in a reverse direction, preferred embodiments of the invention employ a plurality of arrays of wave exciters to give additional control over the mode excited.

5

It will be appreciated that separate exciters and receivers could be provided. However, an advantageous gain in efficiency and simplicity is achieved when the exciter array is operated in a pulse-echoing mode whereby the exciters also serve as receivers.

10

The ability to analyse reflected signals is improved by the use of a technique whereby the signals from each receiver are multiplied by a respective weighting factor appropriate to a particular reflected guided wave mode to determine the strength of signal in that reflected guided wave mode.

15

Whilst information regarding defects or the general condition of the elongate body can be recovered from a wide variety of guided modes, preferably the excited mode is a symmetric mode with respect to the elongate body and the particular received wave mode is either a predetermined non-symmetric or the mode corresponding to the excited mode. It is preferred to analyse both received symmetric and received non-symmetric modes.

20

The non axi-symmetric nature of the elongate body whilst it introduces a difficulty compared to axi-symmetric pipes, does allow for the possibility of particular excited guided wave modes to concentrate on particular areas of the non axi-symmetric elongate body to reveal more information regarding those particular areas. As an example, different excited guided wave modes can be used to concentrate upon the head, web and toe of a railway rail.

25

Whilst the exciters could be fixed to the elongate body in a variety of different ways, in a preferred embodiment the exciter array is secured to the elongate body by a clamping mechanism. Such a clamping mechanism may be either temporarily or

30

WO 02/059593

PCT/GB01/05262

4

permanently fixed to the elongate body. In a further preferred embodiment the transducers are bonded to the rail.

It is particularly convenient to form the exciters using piezoelectric transducers.

5

Whilst the technique of the present invention could be used to examine a wide variety of different non axi-symmetric elongate bodies, such as structural members within bridges or buildings, the invention has particular utility in the testing of railway rails.

10

Whilst the exciters may be simultaneously driven, preferred embodiments sequentially drive different exciters. In this case synthetic aperture processing techniques (synthesised transmission and synthesised reception respectively) may be used to analyse the received waves.

15

Viewed from another aspect the present invention provides a method of inspecting a non-axi-symmetric elongate body comprising the steps of:

driving a plurality of wave exciters coupled to said elongate body with driver signals, each driver signal to a respective wave exciter being weighted with respect to driving signals to other wave exciters such that a guided acoustic wave mode is excited;

20

receiving reflected guided acoustic waves; and  
analysing said received waves to assess a condition of said elongate body.

25

Embodiments of the apparatus for inspecting non axi-symmetric elongate bodies will now be described, by way of example only, with reference to the accompanying figures, in which:

Figure 1 is a schematic diagram of a transverse cross section of a rail;

30

Figure 2 illustrates the dispersion curves of a rail.



WO 02/059593

PCT/GB01/05262

5

Figure 3 illustrates a symmetric mode of a propagating guided wave in which the motion of the head section of the rail is dominant;

5 Figure 4 illustrates a symmetric mode of a propagating guided wave in which the motion of the toe section of the rail is dominant;

Figure 5 illustrates a symmetric mode of a propagating guided wave in which the motion of the web section of the rail is dominant;

10 Figure 6 illustrates an anti-symmetric mode of a propagating guided wave in which the motion of both the head section and the web section of the rail are dominant;

Figure 7 schematically illustrates a typical transducer array according to a first embodiment of the invention;

15 Figure 8 is a linear plot of amplitude against time showing experimental results for propagation modes detected as a result of exciting guided waves in the rail using a single wave exciter;

20 Figure 9 is a linear plot of amplitude against time showing experimental results for propagation modes detected as a result of exciting guided waves in the rail using multiple wave exciters with independent driving voltages;

Figure 10 illustrates a clamping mechanism according to a second embodiment of the invention used for operable attachment of an array of wave exciters to a rail;

25 and  
Figure 11 schematically illustrates a plurality of transducer arrays spaced along the rail.

30 The guided wave modes that can propagate in a rail at a given frequency are identified using a technique similar to that described by L. Gavric 'Computation of

WO 02/059593

PCT/GB01/05262

6

propagative waves in free rail using a finite element technique', *Journal of Sound and Vibration*, Vol 185, pp531-543. This is based on the finite element method, but only a cross section of the rail is modelled.

5           Figure 2 shows phase velocity dispersions curve for a rail that were obtained using the technique referred to above. These dispersion curves can be used to identify the guided wave modes that will propagate in the rail at a given frequency. It can be seen from Figure 2 that the different modes present at a given frequency typically have different propagation velocities.       Figures 3 to 6 are examples of mode shapes for the rail corresponding to guided waves propagating at a frequency of about 17kHz. These mode shapes are calculated using a method similar to that of Gavric. These mode shapes are a representative sample and are not the only mode shapes propagating at the specified frequency. Each of Figures 3 to 6 shows a two dimensional finite element mesh model of the rail. The x axis runs vertically and parallel to the web of the rail; the y axis runs horizontally and parallel to the toe; and the z axis runs parallel to the length of the rail. In each case the deformed web corresponding to the particular propagation mode is plotted alongside the undeformed mesh in which no waves have been excited.

20           Figure 3 shows the rail displacements for a mode in which the head motion is dominant. Figure 3A shows a view of the mesh looking directly between the y and the z axes. The displacement 100 of the head along the z-axis is characteristic of this mode. The upper portion of the web also undergoes some displacement along the z-axis in the same direction as the head. Figure 3B is a view along the y-axis that illustrates the displacement with respect to the vertical. The lower portion of the web is displaced by a small amount from the vertical in the opposite direction with respect to the head. Figure 3C is a view along the z-axis and this shows that there is some displacement of the web which deforms upwards in the middle and at either extremity. Figure 3C also illustrates that this head-mode is symmetric with respect to an axis of symmetry running through the centre of the web and parallel to the x-axis.

WO 02/059593

PCT/GB01/05262

7

Figure 4 shows the rail displacements for a mode in which the toe motion is dominant. Figure 4A shows a view of the mesh looking directly between the y and the z axes. The displacement of the toe is characteristic of this mode. The extremities of the toe along the y-axis both undergo displacements in the positive x direction. The displacements are almost completely confined to the toe region. Figure 4B is a view along the y axis that illustrates the displacement of the extremities of the toe with respect to the vertical. Opposite extremities of the toe are displaced in opposite directions along the z axis such that the rectangular strip corresponding to the undispaced toe is twisted. Figure 4C is a view along the z axis and this shows more clearly the upwards x displacement that increases gradually towards the extremities of the toe. Figure 4C also illustrates that this toe-mode is symmetric with respect to an axis of symmetry running through the centre of the web and parallel to the x axis.

Figure 5 shows the rail displacements for a mode in which the web motion is dominant. Figure 5A shows a view of the mesh looking directly between the y and the z axes. The large displacement of the web along the z-axis is characteristic of this mode. The toe also experiences some displacement in this mode. Figure 5B is a view along the y axis that illustrates the large displacement of the extremities web with respect to the x-axis. The displacement has a maximum at the centre of the web and this decreases gradually towards the extremities of the web. The head is displaced by a small amount in a direction opposite to the displacement of the web. Figure 5C is a view along the z axis and this shows more clearly the displacement of the toe. Figure 5C also illustrates that this web-mode is symmetric with respect to an axis of symmetry running through the centre of the web and parallel to the x axis.

Figure 6 shows the rail displacements for a mode that is anti-symmetric with respect to an axis of symmetry running through the centre of the web and parallel to the x axis. Figure 6A shows a view of the mesh looking directly between the y and the z axes. The web is subject to considerable curvature in the x-y plane and the head undergoes displacement in the z direction such that opposite extremities of the head along the y-axis are displaced in opposite directions along the z-axis. Figure 6B is a view along the y-axis that illustrates the twisting of the web along the x-axis. Figure

WO 02/059593

PCT/GB01/05262

8

6C is a view along the z-axis and this shows more clearly the dominant displacements of the head and web together with small displacements in the toe.

The modes that can be excited are either symmetric or anti-symmetric with respect to the plane of symmetry of the rail that runs vertically through the centre of the web along the length of the rail. If a symmetric wave such as that of Figure 3 is incident on a feature such as a weld that is also symmetric with respect to the plane of symmetry then it is unlikely that any modes excited in the rail will mode-convert to anti-symmetric modes such as the mode illustrated in Figure 6. However defects in the rail such as cracks are highly unlikely to be symmetric, so when a symmetric mode reflects at a crack it will typically be at least partially mode-converted to an anti-symmetric mode having the same frequency as the symmetric outgoing wave. In this case, the reflected signal will include both symmetric and anti-symmetric modes. Analysing the properties of the reflected waves provides a way of distinguishing between the presence of structural defects that induce mode-conversion from good welds that are typically substantially symmetric therefore they do not induce mode conversion. In this embodiment only symmetric modes are excited by the wave exciter array. Alternatively only anti-symmetric modes could be excited that would only mode convert to symmetric modes at a non-symmetric feature. Regardless of whether the excited mode is symmetric or anti-symmetric, the receivers should be capable of detecting both symmetric and non-symmetric modes in the reflected waves. If the defect from which an excited mode reflects is symmetric then only the mode-type of the excited wave will typically be received. Thus, the absence of the anti-symmetric mode-converted wave indicates that the reflector is likely to be symmetric.

Figure 7 shows a cross-section of a rail 70 with an array of transducers according to a first embodiment of the invention deployed at fourteen positions on the surface of the rail. In this embodiment a total of fourteen transducers are arranged around a single cross section of the rail such that six are disposed on the head, four are disposed on the web and four are disposed on the toe of the rail. The number of transducers required increases with the number of unwanted modes to be suppressed

WO 02/059593

PCT/GB01/05262

9

and with the complexity of the mode shapes to be excited. The transducers could be bonded to the rail, although alternative clamping arrangements are described later.

In an alternative embodiment the transducers arranged in a linear array along  
5 the length of the rail.

Each transducer is formed from a piezoelectric element (electro-magnetic acoustic transducers (EMATs) may also be used and may be preferred in  
10 embodiments in which the transducers are mounted on a moving train rather than being clamped to the rail) that is polarised to deform when a voltage is applied across its faces. Thus, each transducer can act as a wave exciter. The voltage applied to each transducer can be adjusted independently according to the amount of deformation required at the corresponding point on the rail surface. Each transducer can also act as a wave receiver by converting the deformations due to the propagation of waves along  
15 the rail to electrical signals. The transducer array is provided with a driving mechanism that is capable of supplying a different driving voltage to each transducer. The driving mechanism consists of a multi-channel signal generator and a power amplifier capable of adjusting each output channel independently. The output from the power amplifier is used to supply excitation signals to high impedance piezoelectric  
20 transducers that serve as wave exciters. The input voltage to each transducer in the array is weighted with respect to the other transducers of the array such that the overall pattern of excitation corresponds to the desired mode shape. The weightings required to excite a particular mode are calculated using a method similar to that of Gavric as previously discussed.

25

EMATs may also, be permanently attached to the rail at strategic points to detect defects at welds.

The transducer array can be used to excite several modes in turn. This can be  
30 used to specifically target defects occurring in the particular parts of the rail preferentially displaced by a given mode. For example the mode shown in Figure 3 is largely confined to the head, the mode shown in Figure 4 is largely confined to the toe

WO 02/059593

PCT/GB01/05262

10

and the mode shown in Figure 5 is largely confined to the web hence these modes can be used to identify defects in the head, toe and web of the rail respectively.

5 Figure 8 is a linear plot of amplitude against time in milliseconds corresponding to guided wave signals induced by a single wave exciter and detected by a single wave receiver. The signal comprises two large amplitude signals corresponding to unwanted excitation-modes and a signal of smaller amplitude corresponding to a reflection from the end of rail. The smaller amplitude signal corresponds to a desired mode.

10

Figure 9 is a linear plot of amplitude against time in milliseconds corresponding to guided wave signals induced using an array of transducers with weighted driving signals and detected using a pulse-echo mode of operation and synthetic aperture techniques. The same weightings were used in transmission and 15 reception. In this case the amplitude of the desired mode reflected from the end of the rail is significantly larger than disturbances due to any unwanted modes.

The advantage of using an array of transducers rather than a single transducer is demonstrated by comparing the signal of Figure 8, that is characterised by spurious 20 modes of larger amplitude than the desired mode, with the signal of Figure 9 where the spurious signals have amplitudes which are small relative to the amplitude of the desired mode. Thus using an array of transducers makes features such as defects and welds easy to identify.

25 Figure 10 shows an array of transducers according to an embodiment of the invention. In this case the transducers are securely attached to a section of rail using a clamping mechanism. The clamping mechanism of this embodiment comprises two arms pivotally attached to each other close to half way along their length. Beyond the pivot, the arms cross over and are attached to a screw mechanism comprising a screw 30 and a rotatable handle. The clamp has an open position and a closed position. The clamp is engaged by rotating the handle of the screw mechanism such that the pivoted arms are drawn together. The clamp is closed such that the transducers are operatively

WO 02/059593

PCT/GB01/05262

11

engaged on the surface of the rail in the positions shown. There are many possible alternative clamping mechanisms and it is also possible to permanently attach the transducers to the rail.

5 If the testing system is to be deployed while the rail is still in use by trains it will not be possible to deploy any transducers on the upper surface of the rail head. Although this makes mode control by weighting inputs to the transducer array more difficult, it is still possible to suppress undesired modes without using transducers to apply force over the upper surface of the rail head. The wave exciter array need not  
10 apply force at points distributed across the whole of the rail surface.

The mode control achievable using a single array of transducers with independent driving frequencies can be improved by using two or more wave exciter arrays separated by predetermined distances along the length of the rail (as illustrated  
15 in Figure 11). Multiple exciter arrays can be used both to suppress unwanted excitations and to increase the amplitude of desired symmetric modes. Multiple arrays can be used to excite particular guided acoustic waves in a single direction along the rail. The use of more than one array is particularly suitable in the case where the transducers cannot be operably engaged on the upper surface of the rail head.

20 Because the wavelengths of alternative modes propagating at a given frequency are typically different it is possible to apply forces to the rail surface via at least two exciter arrays such that certain modes are reinforced while other modes are suppressed. Consider, for example, that the wavelength of a desired mode is  $\lambda$  and the wavelength  
25 of an undesired mode is  $2\lambda$ . If two exciter arrays are placed a distance  $\lambda$  apart along the length of the rail and if an identical excitation signal is applied to both arrays then the excitation will effectively be applied at points of equal phase on the desired mode but at points of opposite phase on the undesired mode. Thus the desired mode signal will be reinforced, however the undesired mode will be suppressed. In situations  
30 where the wavelengths of the desired and undesired modes are not simple multiples of each other the enhancement of desired modes and suppression of undesired modes can be achieved by suitably adjusting the phases of the excitation signals in respective

WO 02/059593

PCT/GB01/05262

12

exciter arrays. The selectivity of guided wave modes propagating in the rail can be improved by employing more than the minimum number of exciter arrays that is required for the mode selection and direction of propagation selection.

5 The wave exciter arrays can be operated in pulse-echo mode such that each array acts as both an exciter and a receiver of reflected waves. When acting as receivers, the transducers of the array convert the mechanical displacements in the surface of the rail detected by each transducer to electrical signals. The electrical signals arising from the displacements detected at each transducer can be  
10 independently amplified according to a predetermined set of weightings. By appropriately adjusting the set of amplification weightings and summing the resulting electrical signals, a signal proportional to the amplitude of any propagating mode of interest may be obtained. The receiver weightings could be adjusted to obtain a signal proportional to the transmitted and reflected mode or to an anti-symmetric mode-converted reflection. In an alternative embodiment the displacements detected at each  
15 transducer can be amplified by the same amount and a weighted sum of the resultant signals is performed in computer software. This test is repeated for each transmitted mode-received mode combination. A first test to detect the presence of any anti-symmetric reflected wave and a second test to detect reflections of the initially  
20 transmitted mode will typically be performed to obtain an indication of the geometry of a feature of the rail such as a weld or a defect. The reception of a pure guided wave mode which is achievable by the performing the weighted sum of the transducer displacements as described above is just as important as the selective excitation of a pure guided wave mode to the effectiveness of the defect detection technique.

25

According to a further embodiment of the invention many transmitted mode-received mode combinations can be analysed simultaneously. In this case each transducer of the exciter array is used in turn to force excitations in the rail and the resulting reflections are received at each element of the receiving array, i.e.  
30 transmission using single transducer and reception using all transducers of the array. If separate transmitting and receiving transducers are used, sending is on one element of the transmitter array with receiving on all elements of the receiver array. If pulse-



WO 02/059593

PCT/GB01/05262

13

echo is used with the same transducers, receiving is on all elements including the transmitter (it is also possible to get reasonable (though somewhat degraded) performance by using a single array without pulse-echo – in this case sending is on one and receiving is on all the others. The first mentioned technique is similar to synthetic aperture techniques often used in ultrasonics. A synthetic aperture is a process in which different signals are measured and recorded one after the other and subsequently combined. Synthetic aperture focusing typically considers a single propagating mode and uses the combined measurements to inspect a particular region in space. In the case of the present invention the displacement amplitude as a function of time is measured at different positions of the transmitting and receiving transducers and a software addition process is used to isolate the behaviour of particular transmitted mode-received mode pairs. The advantage of this embodiment is that multiple pairs can be analysed using a single test. Although this process can result in the requirement to process a large volume of data for a given test, it is possible to reduce the number of excitations required by driving combinations of elements simultaneously rather than individually in a sequence. For example, if it is known that it is only necessary to examine transmitted mode – received mode combinations in which the transmitted mode is symmetric then an excitation can be applied simultaneously to two transducers of the exciter array that are symmetrically arranged with respect to the plane of symmetry. Two sets of processing will typically be required in the synthetic aperture configuration: a first set to detect the received mode corresponding to the symmetric excitation mode and a second set to detect the received mode corresponding to a non-symmetric mode to which the excited wave mode-converts.

25

WO 02/059593

PCT/GB01/05262

14

CLAIMS

1. Apparatus for inspecting a non axi-symmetric elongate body comprising:  
at least one exciter array having a plurality of wave exciters operable to couple  
to an exterior surface of said elongate body;
- 5 a driver unit operable to generate driving signals to excite said plurality of  
wave exciters wherein each driving signal to a respective wave exciter of said array is  
weighted with respect to driving signals to other wave exciters in said array such that  
a guided acoustic wave mode is excited;
- a receiving unit having a plurality of wave receivers capable of receiving  
10 reflected guided acoustic waves; and  
an analysis unit operable to analyse received waves to assess a condition of  
said non axi-symmetric elongate body.
2. Apparatus according to claim 1, comprising at least two exciter arrays located  
15 at predetermined distances with respect to each other along said elongate body wherein  
said wave exciter arrays are operable in co-operation to suppress the propagation of  
unwanted guided wave modes.
3. Apparatus according to any one of the preceding claims, wherein at least one of  
20 said exciter arrays is operable in a pulse-echo mode whereby said wave exciters also  
serve as wave receivers to excite a single guided wave mode and to receive a  
predetermined mode in a reflected wave.
4. Apparatus according to any one of the preceding claims, wherein said analysis  
25 unit is operative to perform a weighted sum of received signals from each wave  
receiver to obtain a signal indicative of an amplitude of said particular received wave  
mode.

WO 02/059593

PCT/GB01/05262

15

5. Apparatus according to claim 4, wherein said excited mode is a symmetric with respect to a plane of symmetry of said elongate body and said particular received wave mode is a non-symmetric mode arising from mode conversion of said excited mode.
- 5 6. Apparatus according to claim 5, wherein a received symmetric mode wave is also analysed by said analysis unit.
7. Apparatus according to claim 1, wherein said at least one wave exciter array is operable to excite in a sequence a plurality of guided wave modes such that each  
10 excited mode assesses a different region of said non axi-symmetric elongate body.
8. Apparatus according to claim 1, wherein said at least one wave exciter array is operable to excite a single guided acoustic wave mode that is symmetric with respect to a plane of symmetry of said elongate body and said analysis unit is operable to  
15 identify a defect in said elongate body by detecting in the received waves at least one of a non-symmetric mode and a symmetric mode.
9. Apparatus according to claim 8, wherein said analytic unit is operable to identify a defect in said elongate body by detecting one non-symmetric mode in the  
20 reflected waves.
10. Apparatus according to any one of the preceding claims, wherein said at least one wave exciter array is secured to said exterior surface of said elongate body by a clamping mechanism.  
25
11. Apparatus according to any one of the preceding claims, wherein said at least one wave exciter array is permanently secured to said exterior surface of said elongate body by a bonding mechanism.
- 30 12. Apparatus according to any one of the preceding claims, wherein said at least one wave exciter array comprises one of a plurality of electromagnetic acoustic

WO 02/059593

PCT/GB01/05262

16

transducers mounted on a moving train; and a plurality of electromagnetic acoustic transducers fixed to said elongate body.

13. Apparatus according to any one of the preceding claims, wherein said wave exciter is a transducer comprising a piezoelectric element that is polarised to deform when a voltage is applied across its faces.

14. Apparatus according to any one of the preceding claims, wherein said elongate body is a railway rail.

10

15. Apparatus according to any one of the preceding claims, wherein said plurality of exciters are sequentially driven.

16. Apparatus according to claim 15, wherein said analysis unit uses synthetic aperture processing to analyse received waves.

15

17. Apparatus according to any one of the preceding claims wherein said exterior surface to which said wave exciters couple is around a transverse cross-section of said elongate body.

20

18. A method of inspecting a non-axi-symmetric elongate body comprising the steps of:

driving a plurality of wave exciters coupled to said elongate body with driver signals, each driver signal to a respective wave exciter being weighted with respect to driving signals to other wave exciters such that a guided acoustic wave mode is excited;

25

receiving reflected guided acoustic waves; and  
analysing said received waves to assess a condition of said elongate body.

30

WO 02/059593

PCT/GB01/05262

1/7

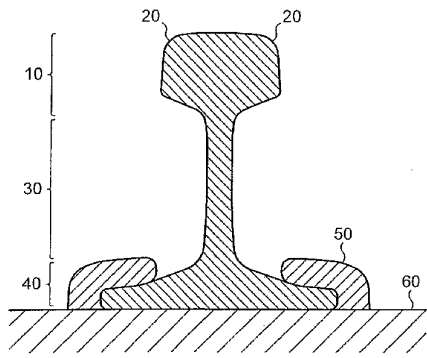


FIG. 1

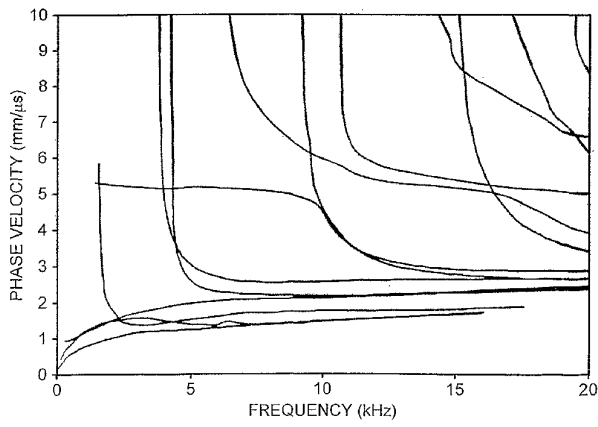


FIG. 2

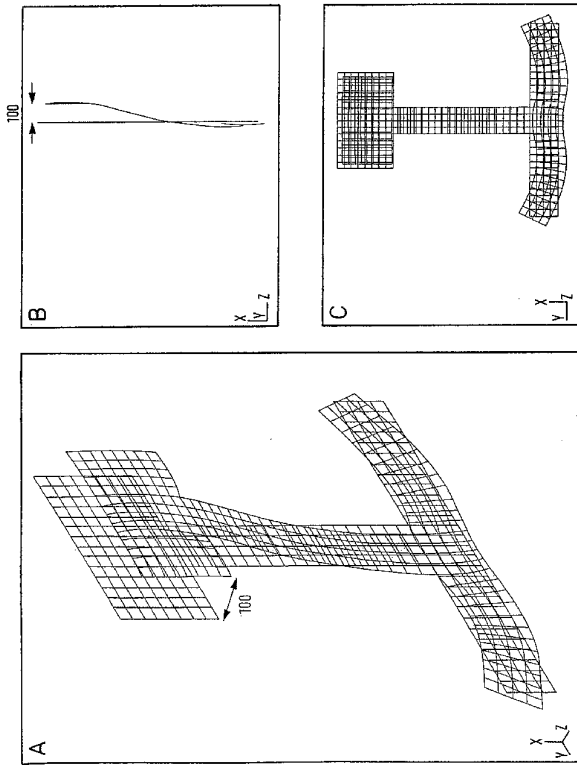


FIG. 3

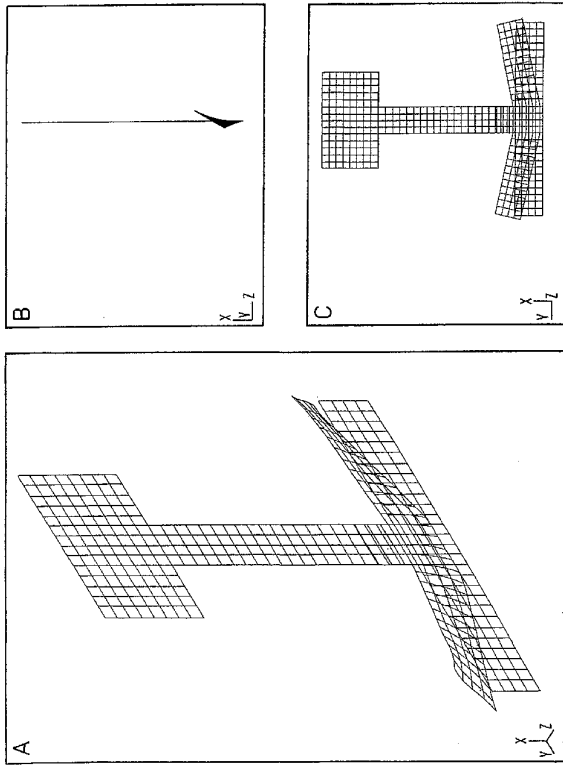


FIG. 4

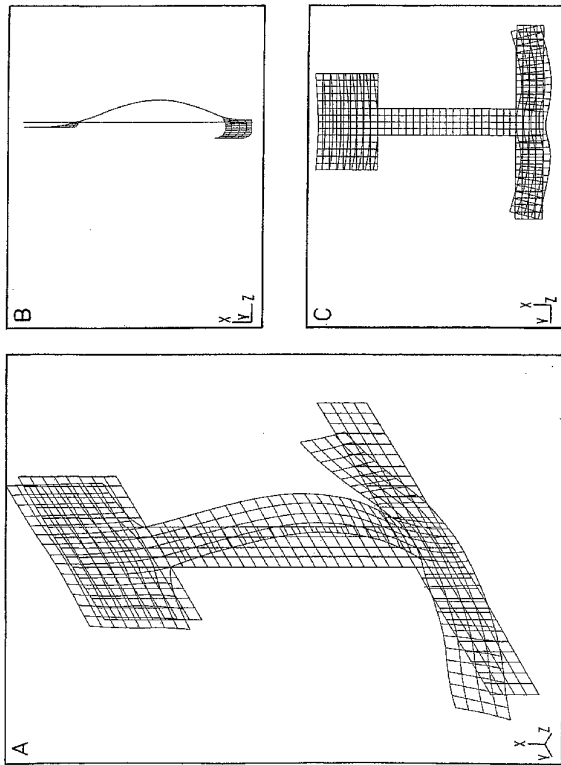


FIG. 5



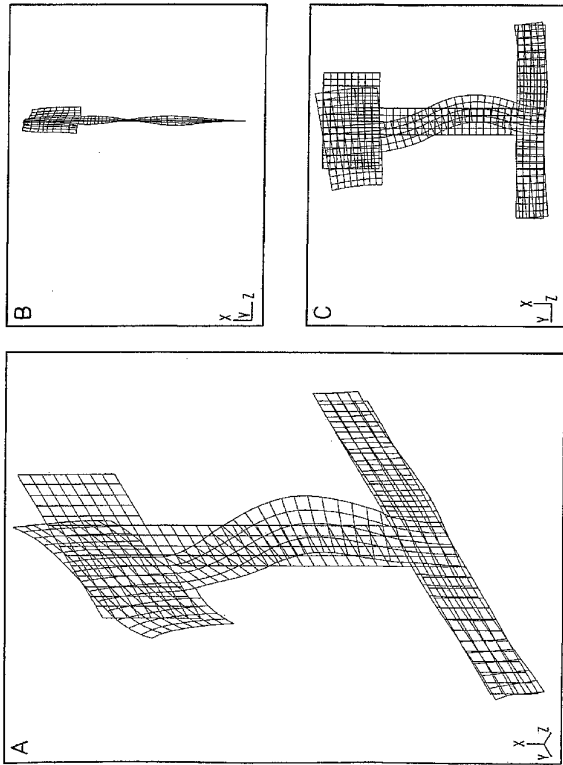


FIG. 6

WO 02/059593

PCT/GB01/05262

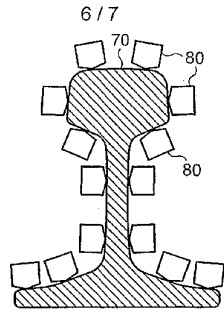


FIG. 7

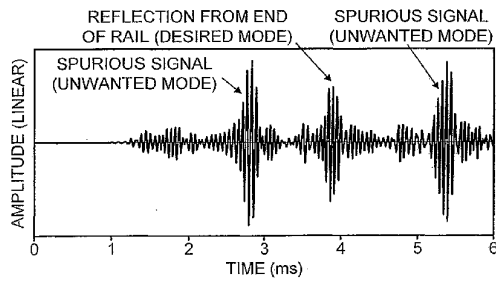


FIG. 8

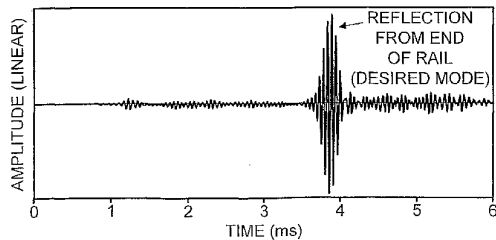
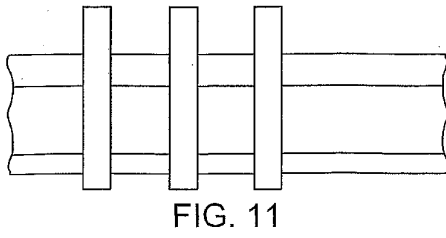
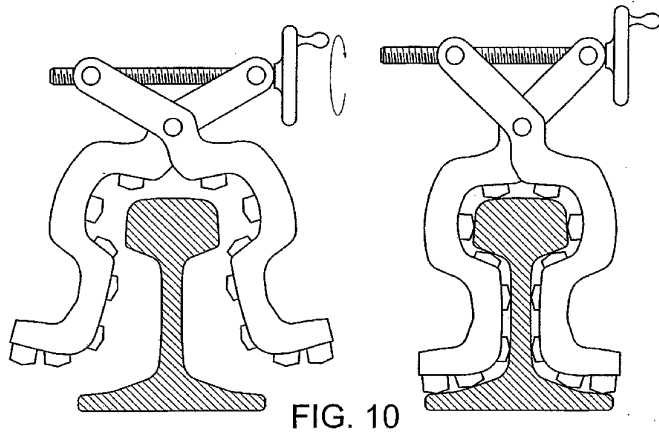


FIG. 9

WO 02/059593

PCT/GB01/05262

7/7



【国際公開パンフレット(コレクトバージョン)】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization  
International Bureau



(43) International Publication Date  
1 August 2002 (01.08.2002)

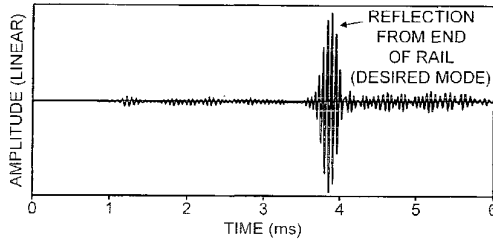
PCT

(10) International Publication Number  
WO 02/059593 A3

- (51) International Patent Classification: G01N 29/04, 29/10
- (21) International Application Number: PCT/GB01/05262
- (22) International Filing Date: 28 November 2001 (28.11.2001)
- (25) Filing Language: English
- (26) Publication Language: English
- (30) Priority Data: 0102118.7 26 January 2001 (26.01.2001) GB
- (71) Applicant (for all designated States except US): GUIDED ULTRASONICS (RAIL) LTD [GB/GB]; Ravenshead, 17 Doverbeck Close, Nottingham NG15 9FR (GB).
- (72) Inventor; and
- (75) Inventor/Applicant (for US only): ALLEYNE, David, Nathaniel [GB/GB]; 565 Rayners Lane, Middlesbrough, Cleveland TS10 1JH (GB).
- (74) Agents: ROBINSON, Nigel, Alexander, Julian et al.; D Young & Co, 21 New Fetter Lane, London EC4A 3DA (GB).
- (81) Designated States (national): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GR, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
- (84) Designated States (regional): ARIPO patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- Published: — with international search report
- (88) Date of publication of the international search report: 4 December 2003

For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.

(54) Title: INSPECTION OF NON AXI-SYMMETRIC ELONGATE BODIES



(57) Abstract: There is described apparatus for inspecting a non axi-symmetric elongate body comprising: at least one exciter array having a plurality of wave exciters operable to couple to an exterior surface of said elongate body; a driver unit operable to generate driving signals to excite said plurality of wave exciters wherein each driving signal to a respective wave exciter of said array is weighted with respect to driving signals to other wave exciters in said array such that a guided acoustic wave mode is excited; a receiving unit having a plurality of wave exciters in said array such that a guided acoustic wave mode is excited; a receiving unit having a plurality of wave receivers capable of receiving reflected guided acoustic waves; an analysis unit operable to analyse received waves to assess a condition of said non axi-symmetric elongate body.

WO 02/059593 A3

## 【 国際調査報告 】

| INTERNATIONAL SEARCH REPORT  |  | International Application No<br>PCT/GB 01/05262                  |
|--|--|--|
| <b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b><br>IPC 7 G01N29/04 G01N29/10  |  |  |
| According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC  |  |  |
| <b>B. FIELDS SEARCHED</b><br>Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)<br>IPC 7 G01N   |  |  |
| 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 practical, search terms used)<br>WPI Data, PAJ, EPO-Internal  |  |  |
| <b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>  |  |  |
| Category *   | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages   | Relevant to claim No.  |
| A  | DE 32 18 453 A (FRAUNHOFER GES FORSCHUNG)<br>17 November 1983 (1983-11-17)<br>abstract<br>page 9, paragraph 2 -page 10, paragraph 2;<br>figure 1 | 1-18   |
| A  | US 4 646 572 A (BOETTGER WOLFGANG ET AL)<br>3 March 1987 (1987-03-03)<br>abstract<br>column 1, line 60 -column 2, line 37;<br>figure 1           | 1-18   |
| A  | US 3 978 712 A (COWAN GERALD DE G ET AL)<br>7 September 1976 (1976-09-07)<br>abstract<br>column 8, line 39 -column 9, line 29;<br>figure 8       | 1-18   |
| <input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of box C. <input checked="" type="checkbox"/> Patent family members are listed in annex.   |  |  |
| * Special categories of cited documents :<br>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance<br>"E" earlier document but published on or after the international filing date<br>"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)<br>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means<br>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed<br>"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<br>"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<br>"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<br>"Z" document member of the same patent family |  |  |
| Date of the actual completion of the international search<br>19 September 2002   |  | Date of mailing of the international search report<br>26/09/2002 |
| Name and mailing address of the ISA<br>European Patent Office, P.B. 5818 Patentaan 2<br>NL - 2280 HV Rijswijk<br>Tel. (+31-70) 340-2000, Tx. 31 651 epo nl,<br>Fax: (+31-70) 340-3016  |  | Authorized officer<br>Kempf, G                                   |

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 1999)

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

 Internat. application No  
 PCT/GB 01/05262

| Patent document cited in search report | Publication date | Patent family member(s) | Publication date |
|--|------------------|-------------------------|------------------|
| DE 3218453 A                           | 17-11-1983       | DE 3218453 A1           | 17-11-1983       |
| US 4646572 A                           | 03-03-1987       | DE 3331468 A1           | 07-03-1985       |
|  |                  | FR 2551212 A1           | 01-03-1985       |
|  |                  | GB 2145822 A ,B         | 03-04-1985       |
|  |                  | IT 1180212 B            | 23-09-1987       |
| US 3978712 A                           | 07-09-1976       | US 3812708 A            | 28-05-1974       |
|  |                  | AU 8148575 A            | 25-11-1976       |
|  |                  | BR 7503262 A            | 23-02-1977       |
|  |                  | CA 984049 A1            | 17-02-1976       |
|  |                  | CH 564194 A5            | 15-07-1975       |
|  |                  | DE 2255983 A1           | 24-05-1973       |
|  |                  | FR 2160557 A1           | 29-06-1973       |
|  |                  | GB 1415531 A            | 26-11-1975       |
|  |                  | JP 1080753 C            | 25-01-1982       |
|  |                  | JP 48063780 A           | 04-09-1973       |
|  |                  | JP 56023099 B           | 29-05-1981       |

---

フロントページの続き

(81)指定国 AP(GH,GM,KE,LS,MW,MZ,SD,SL,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,MD,RU,TJ,TM),EP(AT, BE,CH,CY,DE,DK,ES,FI,FR,GB,GR,IE,IT,LU,MC,NL,PT,SE,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,ML,MR,NE,SN, TD,TG),AE,AG,AL,AM,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BR,BY,BZ,CA,CH,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DK,DM,DZ,EC,EE,ES,FI,GB,GD,GE, GH,GM,HR,HU,ID,IL,IN,IS,JP,KE,KG,KP,KR,KZ,LC,LK,LR,LS,LT,LU,LV,MA,MD,MG,MK,MN,MW,MX,MZ,NO,NZ,OM,PH,PL,PT,RO,RU,SD,SE,SG,SI,SK,SL,TJ,TM,TR,TT,TZ,UA,UG,US,UZ,VN,YU,ZA,ZM,ZW

(72)発明者 アリーン、デイヴィッド、ナサニエル

イギリス国 ミドルセックス、レイナーズ レイン 565

Fターム(参考) 2G047 AA07 AB02 AB07 AC09 BC07 BC11 CA01 CA02 GA05 GB02  
GF20