

慣性航法を用いたランニング運動解析機器における妥当性の検証

古川 雄大 (太陽化学株式会社, yfurukawa@taiyokagaku.co.jp)

水落 俊一 (セイコーエプソン株式会社 ウエアラブル機器事業部, mizuochi.shunichi@exc.epson.co.jp)

杉田 正明 (日本体育大学 体育学部, m-sugita@nittai.ac.jp)

The validity of a running motion analysis device using inertial navigation system

Yudai Furukawa (Taiyo Kagaku Co. Ltd., Japan)

Shunichi Mizuochi (Seiko Epson Corporation, Japan)

Masaaki Sugita (Faculty of sport science, Nippon Sport Science University, Japan)

要約

本研究は、3軸の加速度センサーとジャイロセンサーを搭載した慣性航法を用いたランニング運動解析機器（センサー機器）と既存の三次元運動解析システム（VICON社製 VICON）を用いて走動作の分析を行ない、得られた指標値の比較からセンサー機器の運動解析機器としての妥当性を明らかにすることを目的とした。運動習慣のある健全な成人男性5名を対象とし、約20 mの走路を低速（約3.33 m/s）、中速（約4.17 m/s）、高速（約5.56 m/s）で走行させ、その際の走動作を、腰部に装着したセンサー機器とVICONを用いて測定した。その結果、走速度、上下動、接地時間、ブレーキ、着地角度および蹴り出し角度において級内相関係数（ICC）が0.9以上を示し、桑原ら(1993)の評価基準では“優秀”であった。また、Bland-Altman分析においても、各指標値の一致度は高い水準を示した。さらに、いくつかの指標値においてはVICONよりも精度よく測定している可能性が示された。これらのことから、センサー機器から算出された解析指標値は既存の運動解析機器との一致度が高く、運動解析機器としての妥当性が認められた。

キーワード

慣性航法, 運動解析機器, 加速度センサー, ジャイロセンサー, 走動作

1. 緒言

これまで、長距離走のパフォーマンスに関する生理学的研究は数多く行なわれてきた。特に最大酸素摂取量は、長距離走者の全身持久力を評価する生理学的指標として広く用いられてきた (Costill et al., 1973; 豊岡, 1977)。それに加えて、いかに効率良く走るかという、走の経済性 (RE: Running Economy) を評価することの重要性が唱えられている (榎本, 2004)。

REは、最大下における一定の走速度で走行した時の体重あたりの酸素摂取量のことを言い、同じ走速度であれば少ない酸素摂取量で走れる方が経済的であると考えられている。REは、生理的、心理的、形態的、バイオメカニクスの要因が複雑に絡んでいるとされ、なかでもバイオメカニクスの要因によってREを約50%説明できるという報告もある (Williams et al., 1987)。しかし、長距離走者のランニング動作をバイオメカニク的に分析するには、ハイスピードカメラ、三次元運動解析システム、筋電計および床反力計などの高価な機器、これらの装置を設置する大規模な施設、そして熟練した測定技術が必要とされ一般的とは言い難い。そのような中、軽量、安価、高精度という特徴に加え、屋外でも測定できることや対象者の動作を制限しない、加速度センサーを用いたウェアラブルな装着型の運動解析機器の開発が進められている。加速度センサーを用いた報告としては、女子学生を対象とした日常の身体活動量を計測した報告 (中村他, 2014) や、慢性心不全患者を対象とした活動量評価と生活指導のために加速度

センサーを用いた報告 (荻野他, 2009) など日常生活での活動量を測定したものが多数報告されているが、僅かな動きやダイナミックな動きであっても精度よく、簡便にそして高頻度で計測を行なうことが出来るという加速度センサーの特徴から、スポーツ科学の新たな運動解析機器としての可能性が期待されている。先行研究では加速度センサーと三次元運動解析システムやビデオ画像などの既存の運動解析機器を用いて歩行やランニング動作を測定し、比較を行なっているが、機器による個体差やアルゴリズム、そして対象とした運動様式や強度が違うこともあり、測定結果が一致しているという報告は多くない (松尾他, 2014; PYM et al., 2012)。さらに、センサー機器と既存の運動解析機器との一致度が高いと報告している研究であっても、接地時間の一致度は高いが、上下動の一致度は低いなど測定項目によって一致度が異なるという報告もある (Watari et al., 2016)。そのため、精度が高いとされている加速度センサーであっても、ジャンプ動作やランニングなどの強い衝撃が生じる運動ではその精度が疑問視されており (Casartelli et al., 2010; Castagna et al., 2013; Houel et al., 2011)、Gindreら (2015) は、加速度センサーを身体に装着すると、皮膚や衣服の影響を受け、正確なデータを得ることは難しいことを指摘している。

また、センサー機器の有用性が認められた報告であっても、実験室のトレッドミル上における比較が多く、被験者の走動作に制限をかけていたために得られた結果という可能性も否定できない。しかし、加速度センサー機器と既存の運動解析システムとの比較を通して、センサー機器の妥当性が認められれば、大規模な施設も、高価な機器を使わずとも動作を数値化できるため、新たなスポーツ科学のツールとして研究機関だけでなく、実際の指導現場にも応用することが可能にな

ると考えられる。

そこで本研究では、3軸の加速度センサーとジャイロセンサーを搭載した慣性航法を用いたランニング運動解析機器（センサー機器）と既存の三次元運動解析システム（VICON社製 VICON）を用いて走動作の分析を行ない、得られたデータの比較からセンサー機器の運動解析機器としての妥当性を明らかにすることを目的とする。

2. 方法

2.1 対象

運動習慣のある健全な成人男性5名を対象とした。対象者の特性（平均値±標準偏差、以下同じ）は、年齢43.8±10.4歳、身長170.4±5.1 cm、体重59.0±1.1 kgであった。

2.2 測定方法

被験者に対して、約20 mの走路を低速（約3.33 m/s）、中速（約4.17 m/s）、高速（約5.56 m/s）で走行するように指示し、設定速度になるように努めさせた。その際の走動作を、腰部に装着したセンサー機器と三次元運動解析システム（VICON社製 VICON）を用いて測定した。また、腰部に装着したセンサー機器のキャリブレーションを各試技前に行なった。キャリブレーションは、立位で15秒静止、上体を左右に捻る、立位で15秒静止を順に行なった。

2.3 データ収集

2.3.1 センサー機器

センサー機器にはX、Y、Z軸にそれぞれ対応した3軸の加速度センサーとジャイロセンサーが搭載されており、500 Hzのサンプリング周波数でデータを収集した。センサー自体の重さは約2g、測定範囲は加速度センサーが±16G、ジャイロセンサーが±3000 deg/sである。またセンサーを使用するには電源を必要とするため、スマートフォンの背面にセンサー機器をテープで固定し、USBケーブルを接続して電源を供給するとともに、データもスマートフォンに保存した（図1）。センサー機器は収縮性のあるゴムバンドに入れ、L3～L5棘突起に位置するように装着した。その後、ずれることがないように調整を行なった（図2）。



図1：センサー機器

注：ケーブル装着時の寸法：約18.4 mm × 70 mm × 25 mm、総重量：205 g。

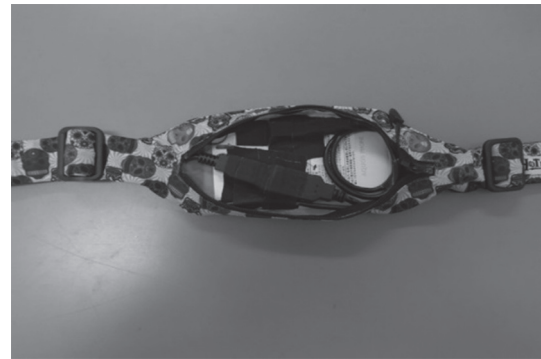


図2：ゴムバンドに入れたセンサー機器

注：ゴムバンドにセンサー機器を入れた総重量：266 g。

また、このセンサー機器は加速度センサーとジャイロセンサーから得られたデータを慣性航法によって対象者の姿勢、速度、位置へと計算し、独自のアルゴリズムと演算処理を用いて解析指標へと変換するものである（図3）。

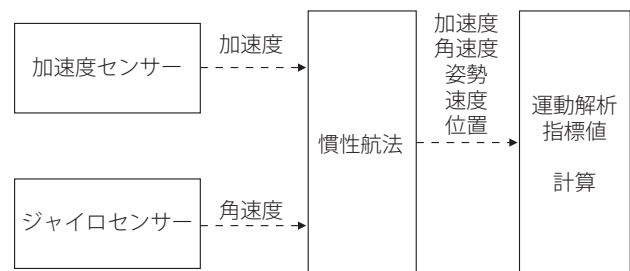


図3：慣性航法による演算フロー

2.3.2 VICON

三次元運動解析システムとしてVICON（VICON社製）を用いた。被験者の身体測定点47点に赤外線反射マーカを貼付し、三次元座標データを収集した。また、その際のサンプリング頻度は100 Hzであり、得られた座標データを基に各項目を算出した。センサー機器とVICONのデータの比較を行なうために、時間を同期させた。また、比較を行なうにあたってサンプリング頻度が異なるため（センサー機器：500 Hz、VICON：100 Hz）、VICONのデータを内挿にて補間した。

2.4 データ解析

センサー機器から得られた加速度と角速度のデータを慣性航法に基づいて演算処理（図3）を行ない、解析指標値を算出した（図4）。VICONに関しては、得られた座標の変位データを基に解析指標値を算出するとともに、座標の変位を微分することで速度および加速度を算出した。算出した解析指標値およびその定義は以下の通りである。

- 走速度 (m/s)
1歩に身体重心が移動した水平距離をそれに要した時間で除したものを走速度とした。

- 上下動(m)
着地後の腰の最下点(立脚中期)と離地後の腰の最高点との差を上下動とした。
- 接地時間(sec)
着地から離地までの時間を接地時間とした。
- 真下着地(m)
着地から立脚中期までの身体重心の移動距離を真下着地とした。
- ブレーキ(m/s)
着地時から立脚中期までの水平速度の減速量をブレーキとした。
- 着地角度(deg)
着地時の身体の移動方向と水平方向が成す角を着地角度とした。
- 蹴り出し角度(deg)
蹴り出し時(離地時)の身体の移動方向と水平方向とが成す角を蹴り出し角度とした。

2.5 統計処理

センサー機器とVICONから得られた各解析指標値の一致度および妥当性を検討するために、各解析指標値について級内相関係数(ICC)とBland-Altman分析(Bland et al., 1986)、ピアソンの積率相関係数を用いた。

級内相関係数(以下ICC)は、本来検者間の信頼性を検討する方法であるが、今回はセンサー機器とVICONという測定機器が走動作を同時に測定するため、2つを検者とみなして測定値の信頼性を検討した。また、得られた相関係数の評価基準として桑原ら(1993)の表を用いた。

Bland-Altman分析(Bland et al., 1986)とは、一対2つの測定値の差をy軸、2つの測定値の平均値をx軸にプロットした散布図(Bland-Altman plot)を作成し、それら測定値が内包する系統誤差の有無を可視的、あるいは統計的に明らかにする

方法である。系統誤差の有無を判定するために、2つの測定値の差(d)の95%信頼区間(95%CI; coefficient interval)が0を含まない場合、測定値が完全に一致するx軸から正・負の一定方向に分布している事を示すため、加算誤差が存在すると判断した。95%CIは、2つの測定値の差の平均(d(-)), 標本数(n)、dの標準偏差(SD_d)、自由度n-1のt値から式(1)で求められる。

$$\bar{d} \pm t \times \sqrt{\frac{SD_d}{n}} \tag{1}$$

また、比例誤差の有無を判断するために、対応する2つの測定値の差(d)と2つの測定値の平均値のデータ群について、相関の有意性の検定を行ない、相関の有意性が認められた場合、比例誤差が存在すると判断した。さらには、誤差の許容範囲(limits of agreement、以下LOA)を $\bar{d} \pm 1.96 \times SD_d$ とした。各統計的有意水準は、すべて危険率5%以下とした。また、統計処理はIBM SPSS Statistics23 (SPSS Japan Inc.IBM社)を用いた。

3. 結果

3.1 走速度

センサー機器の低速、中速、高速の走速度の平均値(±標準偏差、以下同じ)はそれぞれ3.51 ± 0.15、4.39 ± 0.13、5.53 ± 0.19 m/sであった。また、VICONの低速、中速、高速の走速度の平均値はそれぞれ、3.51 ± 0.08、4.33 ± 0.08、5.55 ± 0.17 m/sであった。センサー機器とVICONのICCはr = 0.993であり、桑原ら(1993)の評価基準によると“優秀”であった(表1)。Bland-Altman分析においては加算誤差および比例誤差は認められなかった(表1、図5)。また、センサー機器とVICONの相関係数はr = 0.986であり、有意(p < 0.01)な正の相関関係が認められた(図12)。

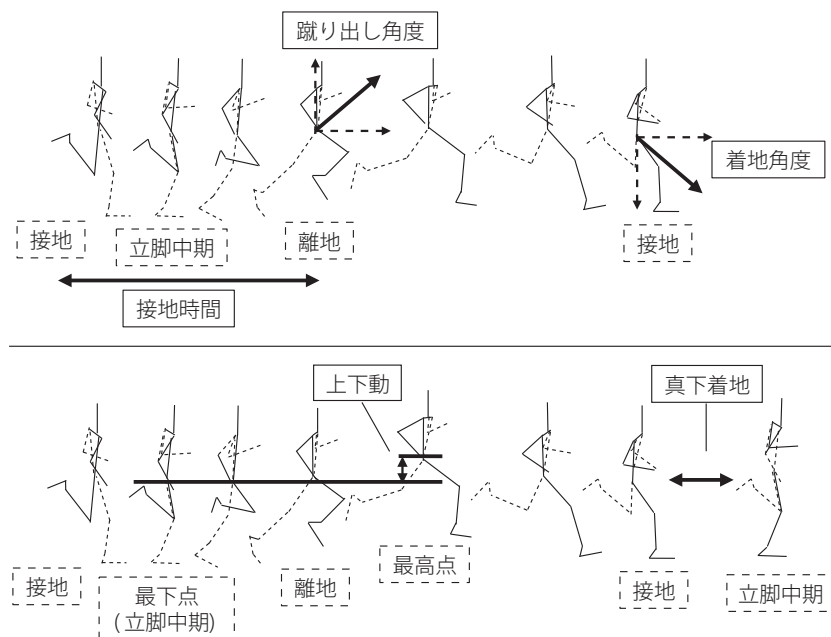


図4：解析指標値の定義

表1：級内相関係数およびBland-Altman分析結果

	級内相関係数		Bland-Altman 分析				
	相関係数	評価	差の95%信頼区間	加算誤差の有無	無相関検定t値	比例誤差の有無	LOA (Limits of Agreement)
走速度 (m/s)	0.993	優秀	-0.07 ~ 0.09	無	-0.093	無	-0.27 ~ 0.29
上下動 (m)	0.962	優秀	-0.005 ~ 0.003	無	-1.688	無	-0.02 ~ 0.01
接地時間 (sec)	0.934	優秀	-0.005 ~ 0.003	無	0.816	無	-0.04 ~ 0.03
真下着地 (m)	0.752	普通	-0.03 ~ 0.05	無	1.096	無	-0.13 ~ 0.15
ブレーキ (m/s)	0.936	優秀	-0.04 ~ 0.06	無	-0.164	無	-0.15 ~ 0.17
着地角度 (deg)	0.948	優秀	-0.89 ~ 0.65	無	-0.075	無	-2.84 ~ 2.60
蹴り出し角度 (deg)	0.927	優秀	-1.66 ~ -0.75	有	-0.378	無	-2.82 ~ 0.41

注：評価は桑原ら(1993)に基づく。

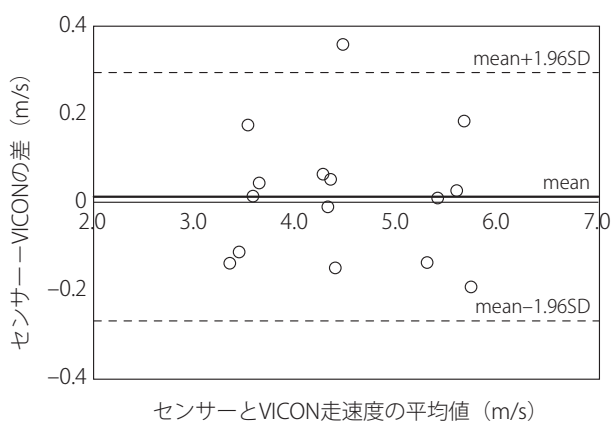


図5：センサー機器とVICONの走速度に関するBland - Altman Plot

3.2 上下動

センサー機器の低速、中速、高速における上下動の平均値はそれぞれ、0.07 ± 0.02、0.06 ± 0.01、0.05 ± 0.01 mであった。また、VICONの低速、中速、高速における上下動の平均値はそれぞれ、0.07 ± 0.02、0.06 ± 0.02、0.05 ± 0.02 mであった。センサー機器とVICONのICCは $r = 0.962$ であり、桑原ら(1993)の評価基準によると“優秀”であった(表1)。Bland-Altman分析においては加算誤差および比例誤差は認められな

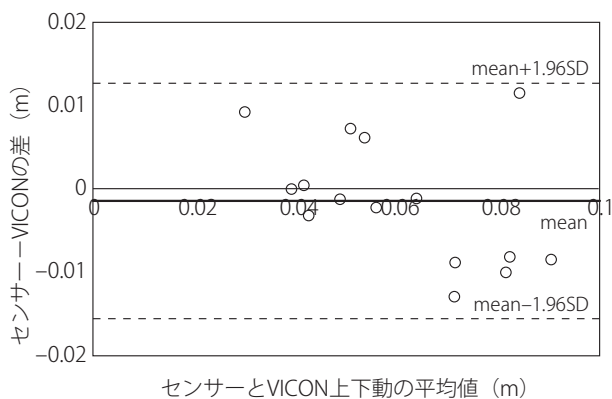


図6：センサー機器とVICONの上下動に関するBland-Altman Plot

かった(表1、図6)。また、センサー機器とVICONの相関係数は $r = 0.940$ であり、有意 ($p < 0.01$) な正の相関関係が認められた(図12)。

3.3 接地時間

センサー機器の低速、中速、高速における接地時間の平均値はそれぞれ、0.24 ± 0.02、0.22 ± 0.01、0.18 ± 0.04 secであった。また、VICONの低速、中速、高速における接地時間の平均値はそれぞれ、0.25 ± 0.01、0.22 ± 0.01、0.18 ± 0.02 secであった。センサー機器とVICONのICCは $r = 0.934$ であり、桑原ら(1993)の評価基準によると“優秀”であった(表1)。Bland-Altman分析においては加算誤差および比例誤差は認められなかった(表1、図7)。また、センサー機器とVICONの相関係数は $r = 0.887$ であり、有意 ($p < 0.01$) な正の相関関係が認められた(図12)。

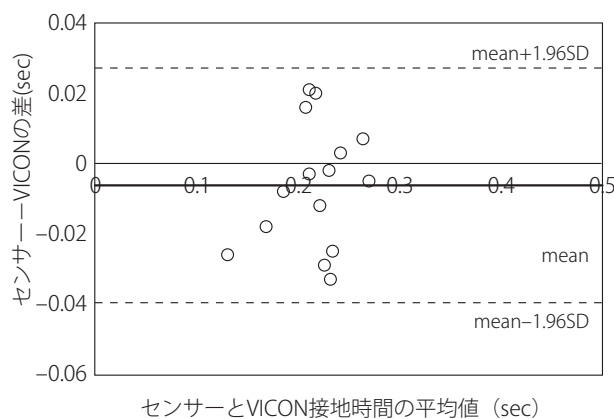


図7：センサー機器とVICONの接地時間に関するBland-Altman Plot

3.4 真下着地

センサー機器の低速、中速、高速における真下着地の平均値はそれぞれ、0.32 ± 0.05、0.39 ± 0.03、0.40 ± 0.12 mであった。また、VICONの低速、中速、高速における真下着地の平均値はそれぞれ、0.32 ± 0.01、0.36 ± 0.04、0.41 ± 0.09 mであった。センサー機器とVICONのICCは $r = 0.752$ であ

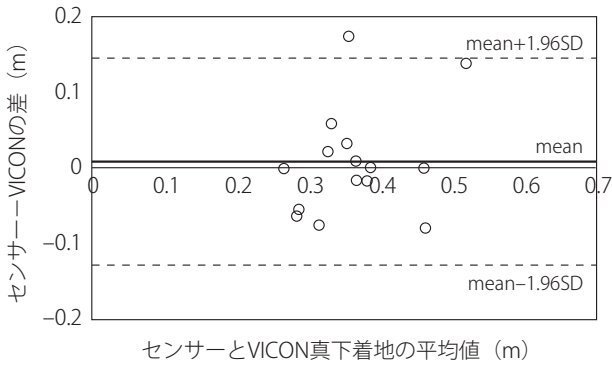


図8：センサー機器とVICONの真下着地に関するBland-Altman Plot

り、桑原ら(1993)の評価基準によると“普通”であった(表1)。Bland-Altman分析においては加算誤差および比例誤差は認められなかった(表1、図8)。また、センサー機器とVICONの相関係数は $r = 0.609$ であり、有意 ($p < 0.02$) な正の相関関係が認められた(図12)。

3.5 ブレーキ

センサー機器の低速、中速、高速におけるブレーキの平均値はそれぞれ、 -0.41 ± 0.07 、 -0.49 ± 0.11 、 -0.54 ± 0.24 m/sであった。また、VICONの低速、中速、高速におけるブレーキの平均値はそれぞれ、 -0.49 ± 0.07 、 -0.44 ± 0.11 、 -0.54 ± 0.25 m/sであった。センサー機器とVICONのICCは $r = 0.752$ であり、桑原ら(1993)の評価基準によると“優秀”であった(表1)。Bland-Altman分析においては加算誤差および比例誤差は認められなかった(表1、図9)。また、センサー機器とVICONの相関係数は $r = 0.936$ であり、有意 ($p < 0.01$) な正の相関関係が認められた(図12)。

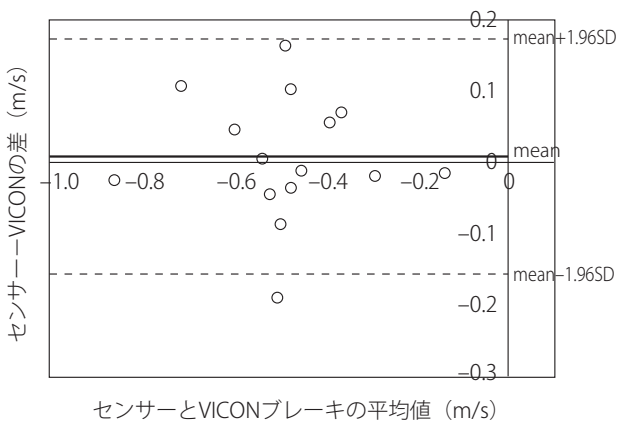


図9：センサー機器とVICONのブレーキに関するBland-Altman Plot

3.6 着地角度

センサー機器の低速、中速、高速における着地角度の平均値はそれぞれ、 12.57 ± 2.19 、 9.27 ± 2.45 、 7.83 ± 2.83 degであった。また、VICONの低速、中速、高速における着地角

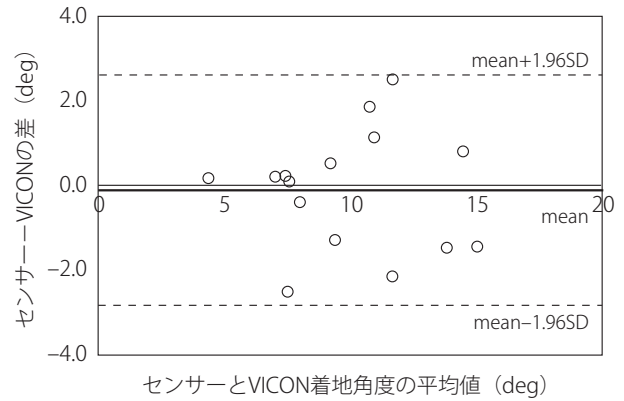


図10：センサー機器とVICONの着地角度に関するBland-Altman Plot

度の平均値はそれぞれ、 12.89 ± 2.45 、 9.29 ± 2.14 、 7.86 ± 2.02 degであった。センサー機器とVICONのICCは $r = 0.948$ であり、桑原ら(1993)の評価基準によると“優秀”であった(表1)。Bland-Altman分析においては加算誤差および比例誤差は認められなかった(表1、図10)。また、センサー機器とVICONの相関係数は $r = 0.896$ であり、有意 ($p < 0.01$) な正の相関関係が認められた(図12)。

3.7 蹴り出し角度

センサー機器の低速、中速、高速における蹴り出し角度の平均値はそれぞれ、 9.89 ± 1.79 、 6.63 ± 1.01 、 4.60 ± 0.99 degであった。また、VICONの低速、中速、高速における蹴り出し角度の平均値はそれぞれ、 10.92 ± 2.11 、 7.84 ± 1.43 、 5.97 ± 1.32 degであった。センサー機器とVICONのICCは $r = 0.927$ であり、桑原ら(1993)の評価基準によると“優秀”であった(表1)。Bland-Altman分析においては加算誤差が認められたため、LOAを算出した結果、 $-2.82 \sim 0.41$ degであり、2つの測定値の差はこの範囲に全ておさまっていた。また、比例誤差は認められなかった(表1、図11)。さらに、センサー機器とVICONの相関係数は $r = 0.950$ であり、有意 ($p < 0.01$) な

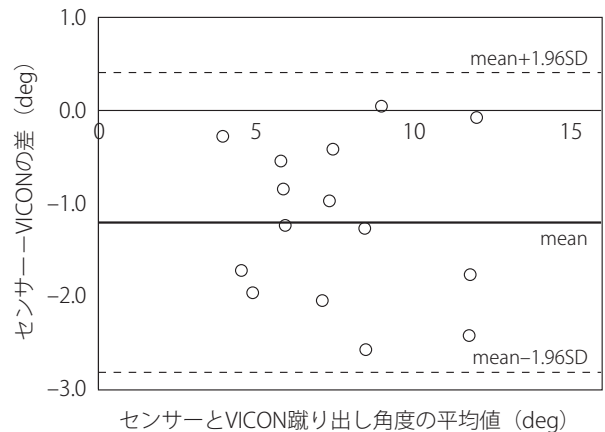


図11：センサー機器とVICONの蹴り出し角度に関するBland-Altman Plot

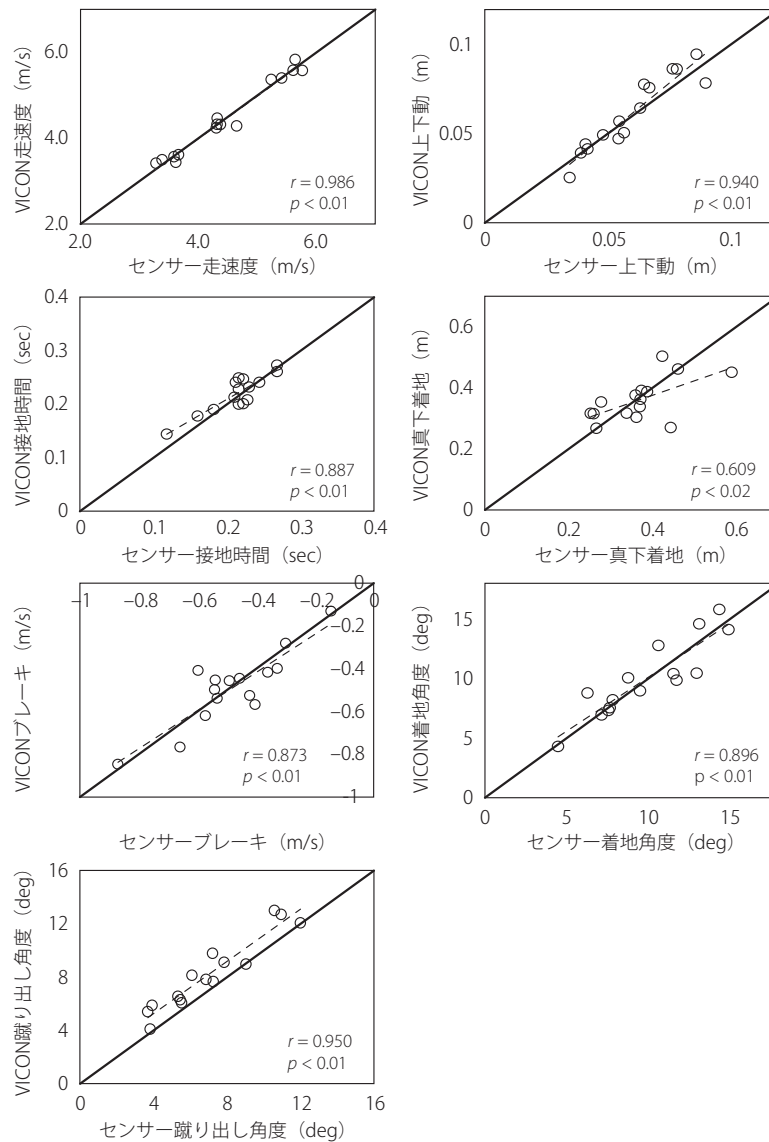


図12：各解析指標値の散布図

正の相関関係が認められた(図12)。

4. 考察

本研究は、走動作をセンサー機器と既存の三次元運動解析システムを用いて同時に測定することにより、2機器間の一致度を検討し、センサー機器の運動解析機器としての妥当性を明らかにすることを目的とした。

その結果、走速度、上下動、接地時間、ブレーキ、着地角度そして蹴り出し角度ではVICONとの級内相関係数 (ICC) が0.9以上であり、桑原ら(1993)の評価においても“優秀”であった(表1)。唯一、真下着地のICCが0.752と他の解析指標値に比べて低値を示したが、その評価も“普通”であった。これは、真下着地とは、身体重心(センサー機器の場合はセンサー機器)が振り出した脚の接地した際の位置から、接地脚の真上に来るまでに移動した距離を算出しており、VICONの身体重心の算出座標とセンサー機器の位置に差があったため、一致度が低くなったのではないかと考えられる。センサー機器

はセンサーを装着した位置が身体重心となり、VICONは身体に装着した反射マーカの位置座標から身体重心を算出しているが、互いの身体重心の位置が異なっていたため一致度が低い結果となったと推察される。また、真下着地のBland-Altman Plot (図8)を見ると、ほとんどの測定においてY軸の0近辺に集約しているにもかかわらず、いくつかの測定においてセンサー機器とVICONとの差が大きいことが見受けられる。これは上記のずれが生じており、身体重心の移動距離を測定する真下着地において差が顕著に表れてしまったものと考えられる。また、真下着地に要する時間は僅か0.04から0.06秒であるため、VICONの測定頻度である100 Hzだと4から6コマ分のデータしか得ることが出来ず、その位置座標の変位から算出すると誤差が生じやすくなるということも考えられる。その点、センサー機器の計測頻度は500 Hzであり、真下着地に要する時間が同じであっても、20から30コマ分のデータを得ることが出来るため、短時間の微細な動きを検知するにはセンサー機器の方が優れていると考えることもできる。

また、本研究で用いた加速度センサーは検知した加速度データを積分して速度や変位を求めるため、ランニング動作のような短時間で僅かな動きを解析するためには、加速度データを積分して解析指標値を算出することによって誤差を最小限に抑えることができるものと考えられる。

さらにBland-Altman分析の結果を見ると、蹴り出し角度以外の解析指標値は加算誤差や比例誤差が認められず、一致度が高い結果となった(表1)。蹴り出し角度は加算誤差が認められたが、Bland-Altman Plotを見るとほとんどのデータが負に位置しており、センサー機器よりもVICONが蹴り出し角度を過大に算出していたことが伺える(図11)。これは、センサー機器は加速度を積分して算出していたのに対し、VICONは変位から角度を算出していたため、誤差が生じ、結果として角度を過大に算出していた可能性が考えられる。しかし、どちらの解析指標値が正確か本研究の結果から断言することはできない。

先行研究では、加速度センサーと既存の3次元運動解析機器による運動解析を比較すると誤差があることが報告されているが(Casartelli et al., 2010; Castagna et al., 2013; Houel et al., 2011; Gindre et al., 2015)、本研究では高い一致度が認められた。これは本研究で用いた加速度センサーおよびジャイロセンサーの測定精度が高いことや、身体への装着位置や装着方法が適切であったと考えられる。しかし、本研究で用いたセンサー機器はランニング運動の解析を目的に開発されたものであるが、運動解析機器として実用化していくためには、歩行動作などのゆっくりとした速度も対象として更に検討する必要がある。

本研究ではセンサー機器と既存の運動解析手法の1つとして3次元運動解析システムVICONとの比較を行ない、解析指標値の高い一致度が認められた。これらのことから、本研究で用いたセンサー機器の精度そして運動解析に用いるアルゴリズムの正確性が認められ、運動解析機器としての妥当性が認められたということができよう。

5. まとめ

本研究では、センサー機器と既存の3次元運動解析システムであるVICONを用いて、走動作を同時に測定し、それぞれから算出される解析指標値の整合性を検討した結果、以下の知見が得られた。

- 走速度、上下動、接地時間、ブレーキ、着地角度および蹴り出し角度において級内相関係数 (ICC) が0.9以上を示し、桑原ら (1993) の評価表では2機器間の前述の解析指標値の一致度は“優秀”であるとされた。
- 真下着地に関しては、VICONとの級内相関係数 (ICC) が0.752を示し、桑原ら (1993) の評価表では“普通”という判断であり、他の指標値に比べ低い評価となったが、センサー機器はVICONに比べてサンプリング頻度が高く、真下着地は0.04秒から0.06秒という短い時間に行われる動作であるため、センサー機器がVICONよりも精度よく、測定している可能性も十分に考えられる。
- Bland-Altman分析において各解析指標値の一致度は高く、

差があっても誤差の範囲内であることが認められた。

- 蹴り出し角度はBland-Altman分析において加算誤差が認められたが、VICONにおいて過大に算出されていた可能性が示された。

以上のことから、センサー機器から算出された解析指標値は既存の運動解析機器との一致度が高く、運動解析機器として妥当性が認められた。

引用文献

- Bland, J. M. and Altman D. G. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet*, Vol. 1, 307-310.
- Bland, J. M. and Altman, D. G. (1999). Measuring agreement in method comparison studies. *Statistical Methods in Medical Research*, Vol. 8, 135-160.
- Casartelli, N., Muller, R., and Maffiuletti, N. A. (2010). Validity and reliability of the Myotest accelerometric system for the assessment of vertical jump height. *Journal of Strength and Conditioning Research*, Vol. 24, No. 11, 3186-3193.
- Castagna, C., Ganzetti, M., Ditroilo, M., Giovannelli, M., Rochtti, A., and Manzi, V. (2013). Concurrent validity of vertical jump performance assessment system. *Journal of Strength and Conditioning Research*, Vol. 27, No. 3, 761-768.
- Cavanagh, P. R., Andrew, G., Kram, R., Rodgers, M., Sanderson, D., and Hennig, E. (1985). An approach to biomechanical profiling of elite and good distance runners. *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 301, 304-308.
- Chung, P. Y. M. and Ng, G. Y. F. (2012). Comparison between an accelerometer and a three-dimensional motion analysis system for the detection of movement. *Physiotherapy*, Vol. 98, 256-259.
- Costill, D. L., Thonason, H., and Robert, E. (1973). Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Medicine and Science in Sports*, Vol. 5, 248-252.
- 榎本靖士 (2004). 長距離走動作のバイオメカニクス的評価法に関する研究. 平成16年度筑波大学博士論文.
- Gindre, C., Lussiana, T., Hebert-Losier, K., and Jean-Benoit, M. (2015). Reliability and validity of the Myotest for measuring running stride kinematics. *Journal of Sports Science*, Vol. 34, No. 7, 664-670.
- 荻野智之・高橋哲也・森沢知之・加治佐望・新井秀宜・有井融・和田智弘・福田能啓 (2009). 3軸加速度計を用いた慢性心不全患者の活動量評価と生活指導について. 第45回日本理学療法学会大会, セッションID: P3-180.
- 畠圭佑・江田茂之・塩野谷明 (2013). 短距離走における実レース計測のためのセンサシステムの開発と測定. 日本機械学会講演論文集.
- Houel, N., Dinu, D., Fauray, A., and Seyfried, D. (2011). Accuracy and reliability of the Myotest pro system to evaluate a squat jump. *Procedia Engineering*, Vol. 13, 434-438.
- 金澤文彦・有村真二・湯浅直美 (2009). 中速移動移動体への

-
- PTK-GPS適用化技術の開発に関する技術資料—ソフトウェア仕様書—. 国土技術政策総合研究所資料, Vol. 514.
- Kawabata, M., Goto, K., Fukusaki, C., Sasaki, K., Hihara, E., Mizushina, T., and Ishii, N. (2013). Acceleration patterns in the lower and upper trunk during running. *Journal of Sports Sciences*, Vol. 31, No. 16, 1841-1853.
- 桑原洋一・斎藤俊弘・稲垣義明 (1993). 検者内および検者間のReliability (再現性, 信頼性) の検討—なぜ統計学的有意が得られないのか—. 呼吸と循環, Vol. 41, No. 10, 945-952.
- 松尾弘毅・森洋人・谷口憲彦・白鳥典彦・岡田恵也・市川和豊・野澤秀隆 (2014). 走動作用ポータブル計測システムの開発. 日本機械学会講演論文集.
- McGregor, S. J., Busa, M. A., Yaggie, J. A., Bollt, E. M. (2009). High resolution MEMS accelerometers to estimate VO₂ and compare running mechanics between highly trained intercollegiate and untrained runners. *PLoS One*, Vol. 4.
- Moe-Nilssen, R. and Helbostad, J. L. (2004). Estimation of gait cycle characteristics by trunk accelerometry. *Journal of Biomechanics*, Vol. 37, 121-126.
- 中村有紀・曾我芳枝・平工志穂 (2014). 加速度計による女子大学生の身体活動量からみる女性の健康. 東京女子大学紀要論集 科学部門報告, Vol. 65, 2013-2022.
- 豊岡示朗 (1977). 長距離ランナーの「トレーニングの可能性」と有酸素的パワー. 体育の科学, Vol. 27, 436-441.
- Watari, R., Hettinga, B., Osis, S., and Ferber, R. (2016). Validation of a torso-mounted accelerometer for measures of vertical oscillation and ground contact time during treadmill running. *Journal of Applied Biomechanics*, Vol. 32, 306-310.
- Williams, K. R. and Cavanagh, P. R. (1987). Relationship between distance mechanics, running economy, and performance. *Journal of Applied Physiology*, Vol. 63, 107-118.
- 山地啓司 (1997). ランニングの経済性に影響を及ぼす要因. 日本生理学雑誌, Vol. 4, 81-98.

(受稿：2017年5月8日 受理：2017年5月29日)