

Analisis Kinematika Gerak Pusat Massa Tubuh Manusia Saat Berjalan

Sardjito^a, Nani Yuningsih^a, Kunlestiowati Hadiningrum^a

^aUP MKU, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
E-mail: inarwj@yahoo.com

ABSTRAK

Untuk mendeskripsikan fenomena fisis yang terjadi pada suatu sistem, perlu dibuat model penyederhanaan dari sistem tersebut, baik secara visual maupun matematis. Dengan demikian analisis terhadap sistem lebih mudah dilakukan. Model fenomena fisika terhadap gejala-gejala biologi, dapat dirumuskan melalui konsep-konsep yang berlaku secara umum dalam ilmu fisika. Model kinematika bagi gerak manusia yang berjalan melangkah secara teoritis dapat diturunkan dari persamaan Lagrangian yang melibatkan energi kinetik dan energi potensialnya. Analisis teoritik didasarkan pada analogi gerak tubuh dengan model osilasi, yang daripadanya dapat dibuat persamaan gerak, kemudian ditentukan solusinya baik secara analitik maupun numerik. Analisis eksperimental dilakukan dengan mengamati rekaman video, serta pengukuran terhadap posisi titik pusat massa tubuh.

Model geraknya menunjukkan adanya osilasi pusat massa tubuh baik pada arah mendatar maupun pada arah vertikal. Hasil pengujian teoritis dicocokkan dengan data eksperimen untuk memperoleh model biomekanika yang tepat bagi kondisi gerak tubuh manusia. Model teoritis ini sesuai dengan hasil pengukuran yang dilakukan menggunakan analisis video terhadap gerak langkah yang sesungguhnya.

Kata Kunci

Gerak melangkah, osilasi, pusat massa tubuh

To describe physical phenomena that occur in a system, it is necessary to simplify models of the system, both visually and mathematically. Thus analysis of the system much more easy. Models of physical phenomena applied to biological phenomena, can be formulated through the concepts are generally applicable in the physical sciences. Kinematic modeling for human walking motion during gait has been developed theoretically from Lagrange Equation including its kinetic and potential energy. Theoretical analysis based on an analogy with the model oscillating motion of the body, which may be made of equations of motion, resulting solution which is determined both analytically and numerically. Experimental analysis is done by observing video footage, as well as the measurement of the position of the center of mass of the body.

This model shows that the centre of mass of human during gait oscillates in vertical direction as well as in horizontal direction. Theoretical results is matched to experimental data in order to obtain the proper biomechanical models for the state of motion of the human body. This model is in confirmation with empirical data resulting from measurement using gait video analysis.

Keywords

Gait motion, oscillation, human centre of mass

1. PENDAHULUAN

Gejala alam pada umumnya tidak cukup dijelaskan secara deskriptif, tetapi justru banyak gejala alam yang lebih mudah dipahami melalui pemodelan, baik model visual maupun matematis. Melalui model tersebut, dapat dilakukan pengembangan lebih lanjut. Hampir semua bidang ilmu, baik ilmu dasar maupun ilmu terapan, termasuk fisika, dapat dijelaskan dan dikembangkan melalui pemodelan visual dan matematis. Untuk mendeskripsikan fenomena fisis yang terjadi pada suatu sistem, dapat dijelaskan melalui suatu model penyederhanaan dari sistem tersebut.

Model fisika dari gerakan yang terjadi pada tubuh manusia telah diteliti oleh Borg F.G.^[1] yang kemudian dikembangkan lebih jauh oleh Sardjito & Yuningsih^[2]. Pada saat berdiri, tubuh manusia dapat dimodelkan sebagai bandul fisis yang berayun ke arah depan-belakang, maupun pada arah samping kiri-kanan, dengan poros ayunannya terletak pada sendi *ankle*. Model osilasi bebas dari titik berat tubuh ternyata harus dikoreksi dengan adanya beberapa gaya pengontrol (yang dilakukan oleh tendon *Achilles*) menjadi osilasi paksa.

Perbandingan antara amplitudo gerak arah vertikal dengan amplitudo gerak arah mendatar akan menentukan keadaan batas antara kondisi berjalan dan berlari.

Model fisis yang diusulkan oleh Sardjito & Yuningsih ini ternyata sesuai dengan data empirik yang diteliti di bidang medis dan paramedis dalam kaitannya dengan terapi medis bagi para penyandang kelainan tubuh^(2,3,4). Dengan demikian, diharapkan model yang telah dan akan dikembangkan akan saling mendukung dengan kegiatan yang dilakukan para ahli terapi medis terhadap para pasiennya.

Berdasarkan uraian di atas, perlu dilakukan pendekatan kuantitatif untuk menjelaskan berbagai gejala biomekanika yang terjadi, dengan metoda analitik yang banyak dilakukan dalam fenomenologi sains & teknik. Model yang pernah diteliti belum sepenuhnya sesuai dengan kondisi sesungguhnya yang terjadi, karena pendekatannya masih memerlukan beberapa koreksi (dengan memasukkan komponen gaya paksa dari luar dan dengan menerapkan teori gangguan). Pengukuran yang lebih teliti akan dilakukan dengan mengacu pada metoda yang pernah dilakukan oleh Verkerke⁽⁵⁾ untuk menentukan titik pusat tekanan tubuh pada saat bergerak di atas *treadmill*, serta analisis video berdasarkan konten.

Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan model gerak manusia saat berjalan. Untuk meninjau gerak pusat massa tubuh manusia saat berjalan atau melangkah melalui analisis kinematika yang menghasilkan model yang paling sesuai dengan kondisi geraknya adalah model gerak selaras atau gerak harmonik. Gard dalam Gatev et al.^[3] memperlihatkan bahwa gerak pusat massa tubuh manusia saat melangkah mendekati kondisi osilasi harmonik baik pada arah mendatar maupun arah vertikal. Amplitudo gerak vertikal titik pusat massa akan bertambah besar seiring dengan bertambahnya laju gerak horizontal. Bila laju horizontal makin diperbesar, suatu saat akan terjadi perubahan status gerak dari berjalan menjadi berlari. Kondisi ini berkaitan erat dengan perbandingan antara amplitudo vertikal dengan amplitudo horizontal.

2. ANALISIS TEORITIS GERAK MELANGKAH PADA SAAT MANUSIA BERJALAN

Jika tubuh manusia berjalan dengan laju tunak (*steady state*) v maka persamaan gerak:

- Ke arah horisontal dapat ditulis sebagai

$$x(t) = vt \quad (1)$$

- Ke arah vertikal

$$y(t) = h, \quad (2)$$

Dengan h adalah tinggi pusat massa dihitung dari acuan. Dari kedua persamaan diatas diperoleh persamaan resultan $R(t)$. Besar perpindahannya dapat ditulis sebagai:

$$\Delta r(t) = R(t) - r(t) \quad (3)$$

Jika ada gaya penggerak tubuh sebagai gaya luar sebesar $\Delta F(t)$, maka gaya reaksi oleh tanah adalah

$$F(t) = \Delta F(t) - mg \quad (4)$$

Gaya penggerak tubuh ini dilakukan oleh sistem internal tubuh dari kontraksi otot tendon dan karena setiap langkah merupakan siklus, maka perata-rataannya adalah nol agar kondisi tunak (*steady state*) tetap terpenuhi. Dalam bentuk matematika dapat ditulis sebagai berikut :

$$\langle \Delta F(t) \rangle_{siklus} = \frac{1}{T_{siklus}} \int_0^{T_{siklus}} \Delta F(t) dt = 0 \quad (5)$$

Dengan : $T_{siklus} \equiv$ perioda siklus yakni waktu tempuh satu langkah penuh dan akan merupakan fungsi dari laju, maka dapat ditulis sebagai $T_{siklus}(v)$.

Jika gerak pusat massa dianggap harmonik, energi potensial elastiknya akan memiliki bentuk:

$$\Delta U = \frac{1}{2} k (\Delta x^2 + \Delta y^2), \quad (6)$$

dengan k adalah koefisien kekakuan yang merupakan fungsi dari v .

Sedangkan energi kinetiknya akan memiliki bentuk persamaan:

$$\Delta K = \frac{1}{2} m (\Delta \dot{x}^2 + \Delta \dot{y}^2), \quad (7)$$

Dengan:

$$\Delta \dot{x} = \frac{\partial \Delta x}{\partial t}$$

$$\Delta \dot{y} = \frac{\partial \Delta y}{\partial t}$$

Berdasarkan kaidah Lagrangian, $L = \Delta K - \Delta U$, konstan,

dengan $\frac{\partial L}{\partial t} = 0$,

diperoleh $m\Delta \ddot{r} + k\Delta r = 0$, (8)

Dengan :

$$\Delta \ddot{r} = \frac{\partial^2 \Delta r}{\partial t^2} \text{ dan } \Delta r = \Delta x + \Delta y$$

Persamaan (8) merupakan persamaan gerak getaran harmonik yang solusi geraknya:

$$\Delta x(t) = A \cos \left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2} \right)$$

A = amplitudo arah mandatar
dan

$$\Delta y(t) = B \sin\left(\omega_o t - \frac{\pi}{2}\right),$$

B = amplitudo arah vertikal

Dengan $\omega_o = \frac{2\pi}{T_{siklus}} = \sqrt{\frac{k}{m}}$ atau $k = m\omega_o^2$, dan

m = massa tubuh.

Untuk gerak harmonik, gaya penggeraknya memiliki bentuk

$$\Delta F(t) = -k\Delta r \dots\dots\dots(9)$$

Pada arah horisontal, komponennya

$$\Delta F_x(t) = -m\omega_o^2 \Delta x(t),$$

dan pada arah vertikal, komponennya

$$\Delta F_y(t) = -m\omega_o^2 \Delta y(t).$$

Bentuk lintasan titik pusat massa tubuh, secara implisit mempunyai persamaan :

- Arah horisontal

$$x(t) = vt + A \cos\left(\omega_o t - \frac{\pi}{2}\right) \dots\dots\dots(10.a)$$

- Arah vertikal

$$y(t) = h + B \sin\left(\omega_o t - \frac{\pi}{2}\right) \dots\dots\dots(10.b)$$

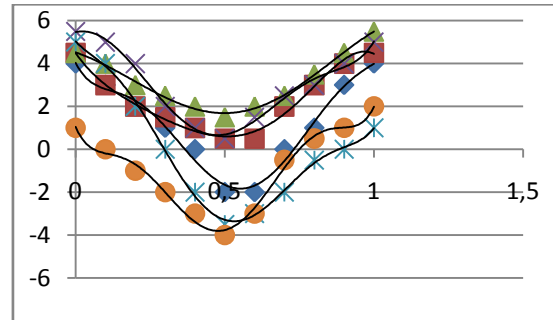
3. ANALISIS KINEMATIKA HASIL PENGUKURAN SIMPANGAN PUSAT MASSA TUBUH SAAT MELANGKAH

Untuk memeriksa keberlakuan model teoritis yang diperoleh pada persamaan 10.a dan 10.b di atas, dilakukan pengukuran simpangan gerak pusat massa tubuh manusia saat bergerak melangkah. Pengukuran dilakukan menggunakan analisis video menggunakan piranti SIMI 7,0 terhadap beberapa sampel yang bergerak melangkah selama beberapa perioda gerak, dengan kelajuan yang diusahakan konstan, dan konsekuensi frekuensi sudut ω_o pun konstan.

$\omega_o = 2\pi/T$, adalah frekuensi sudut osilasi yang bersangkutan, dengan T menyatakan perioda. Untuk gerak satu langkah, T adalah tengat waktu tiap langkah, sejak kaki terlepas kontak dari tanah hingga kembali menyentuh tanah secara berturutan. Oleh karena itu perioda T untuk osilasi mendatar sama besarnya dengan perioda T untuk osilasi vertikal.

Dari hasil pengukuran menggunakan analisis video terhadap gerak pusat massa tubuh, bentuk lintasan gerak pusat massa secara mendatar dapat dilihat pada gambar 1 berikut ini. Absis menyatakan waktu atau fase gerak, dalam

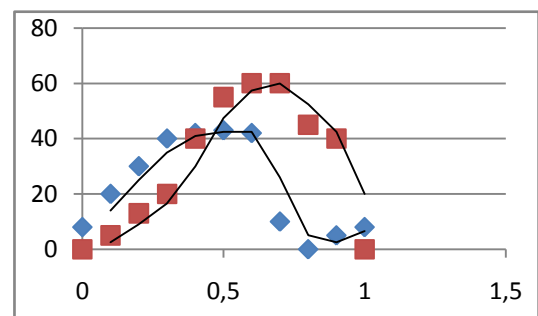
% langkah, sedang ordinat menyatakan simpangan pusat massa arah mendatar dengan mengeliminasi kelajuan mendatar seluruh tubuh (v).



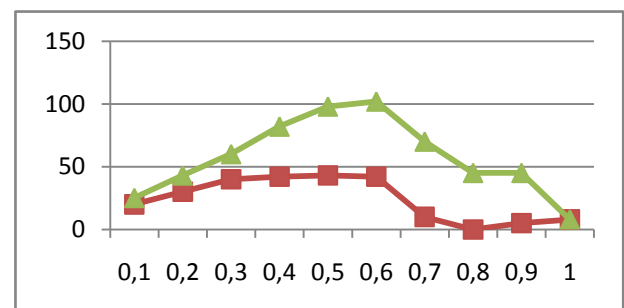
Gambar 1: Simpangan pusat massa tubuh arah mendatar

Terlihat bahwa osilasi pusat massa tubuh arah mendatar menunjukkan simpangan minimum pada pertengahan langkah, sedang pada tahap awal dan akhir langkah, simpangannya berada pada keadaan maksimum.

Gambar 2.a dan 2.b berikut ini menunjukkan hasil pengukuran simpangan vertikal pusat massa terhadap fase langkah.



Gambar 2.a: Simpangan vertikal gerak pusat massa tubuh terhadap fase langkah

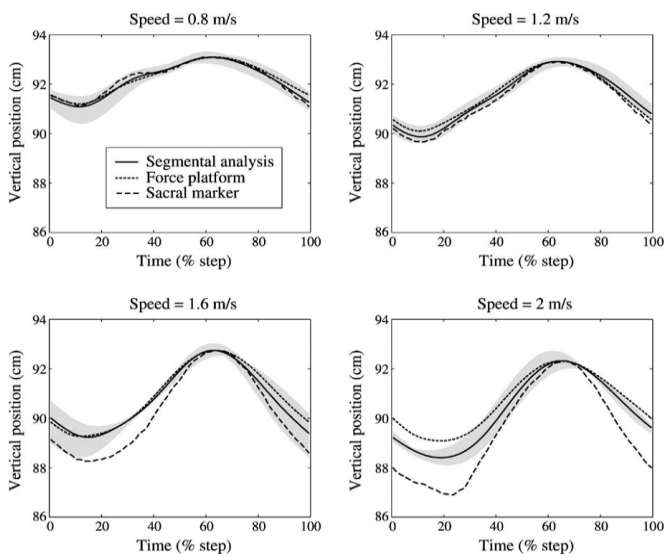


Gambar 2.b: Simpangan vertikal gerak pusat massa tubuh terhadap fase langkah

Berbeda dengan gerak osilasi arah mendatar yang simpangannya mencapai minimum di tengah-tengah fase

langkah, pada osilasi arah vertikal pusat massa tubuh manusia mencapai simpangan terbesar pada pertengahan fase langkah.

Gambar 3 (kutipan dari hasil penelitian Gard et al, dalam Gatev^[3]) memperlihatkan bahwa amplitudo gerak vertikal titik pusat massa akan bertambah besar seiring bertambahnya laju gerak horizontal. Bila laju horizontal makin diperbesar, suatu saat akan terjadi perubahan status gerak dari berjalan menjadi berlari. Hal ini terkait erat dengan perbandingan antara amplitudo vertikal dengan amplitudo horizontal. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini sesuai dengan apa hasil penelitian Gard di atas.

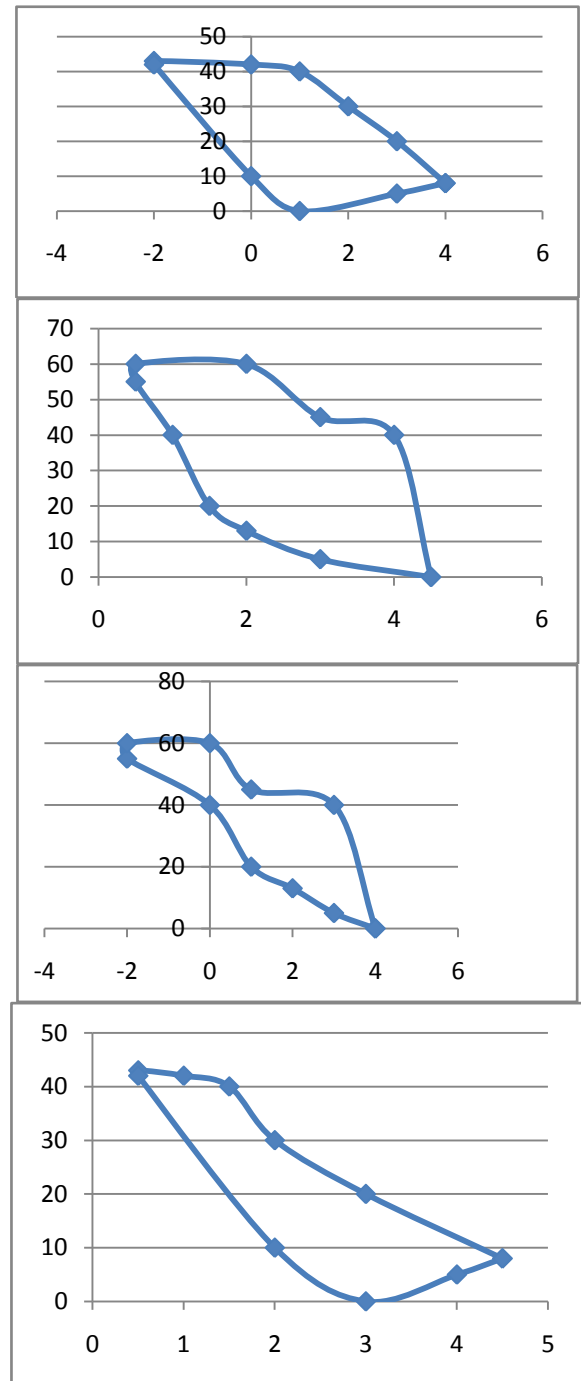


Gambar 3: Simpangan vertikal pusat massa tubuh saat berjalan terhadap waktu untuk berbagai laju gerak horizontal

Jika tinjauan dibatasi pada osilasi titik pusat massa saja, dengan mengeliminasi parameter t, maka akan didapat persamaan lintasan antara simpangan mendatar (x) terhadap simpangan vertikal (y), sebagai :

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1 \dots\dots\dots (11)$$

Persamaan 11 di atas jika digambarkan akan berbentuk ellips dengan perbandingan antara panjang sumbu datar dan sumbu tegak yang bervariasi, bergantung pada nilai A dan B. Hasil empirik dari analisis video terhadap gerak pusat massa yang menyatakan hubungan antara simpangan datar (x) dengan simpangan tegak (y) diperlihatkan pada gambar 4 berikut :



Gambar 4: Posisi pusat massa tubuh ditinjau dari simpangan mendatar(x-absis) dan simpangan vertikal (y – ordinat)

Tinjauan terhadap osilasi titik pusat massa tubuh pada arah vertikal dan arah horizontal dapat mengarah pada kondisi batas antara model berjalan dan berlari. Tubuh dikatakan berjalan bila amplitudo gerak osilasi titik pusat massa arah vertikal masih lebih kecil dari pada amplitudo gerak osilasi titik pusat massa arah horizontal (x dan y membentuk ellips yang cenderung datar). Bila bentuk ellips makin meruncing

kearah tegak, suatu saat ellips akan berubah menjadi lingkaran, dan ini terjadi pada saat amplitudo vertikal sama dengan amplitudo horizontal. Pada keadaan ini, terjadi perubahan status gerak, dari berjalan menjadi berlari, karena pada saat itu mulai terjadi gerak melayang, yakni ada fase saat tubuh tidak bersentuhan dengan lantai.

4. KESIMPULAN

Pada saat gerak melangkah atau berjalan, pusat massa tubuh manusia mengalami osilasi baik pada arah mendatar maupun pada arah vertikal. Pada pertengahan fase langkah, simpangan arah mendatar berada pada kondisi minimum, sedang simpangan arah vertikal berada pada kondisi maksimum.

UCAPAN TERIMA KASIH

Makalah ini merupakan bagian dari Kegiatan Penelitian Fundamental berjudul “Model Biomekanika dari Dinamika Titik Berat dan Titik Pusat Tekanan Tubuh Manusia Saat Berdiri, Berjalan, dan Berlari”. Penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada Direktur

Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia yang telah memberikan kepercayaan melalui Hibah Penelitian Fundamental Tahun Anggaran 2013 kepada tim penulis. Tidak lupa juga penulis mengucapkan terimakasih kepada Politeknik Negeri Bandung melalui UPPM yang telah memfasilitasi penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Borg F.G., (2005), An Inverted Pendulum With A Springly Control Model, *arXiv:physics/0512122v1*, 14 Dec 2005.
- [2] Sardjito, Yuningsih N., (2007), Model Bandul Terbalik Bagi Keadaan Manusia Berdiri, *Sigma Mu*, 1(2),2007, pp 35-41.
- [3] Gatev P. et.al., (2001), *Journal of Physiology* 532-2001, pp.879-891.
- [4] Kotaro S, Neptune R.R., (2006), Differences in muscle function during walking and running at the same speed, *Journal of Biomechanics* 39(11), p 2005-2013.